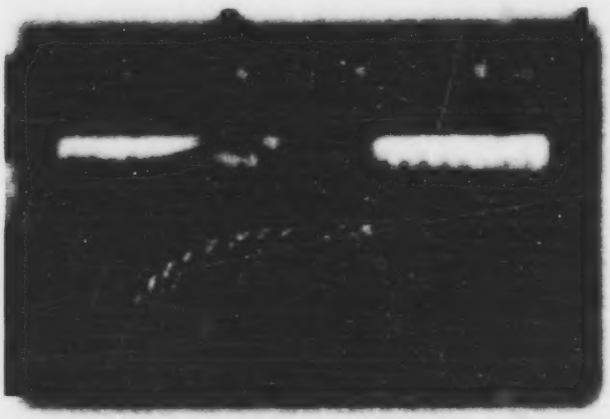
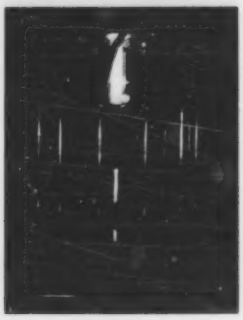
Journée d'information
scientifique et technique
en génie agroalimentaire





Le mercredi 21 mars 2001
Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments (CRDA), Saint-Hyacinthe
Compte rendu des conférences

UNIVERSITÉ LAVAL

Agriculture and Agri-Food Canada / Agriculture et Agroalimentaire Canada

Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Québec Ministère de l'Environnement

irda

Association des ingénieurs en agroalimentaire du Québec

Québec Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

101-04380/

Journée d'information scientifique et technique en génie agroalimentaire

Le mercredi 21 mars 2001
Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments (CRDA), Saint-Hyacinthe
Compte rendu des conférences

On peut obtenir ce compte rendu des conférences au prix de 30,00$ l'unité. Envoyez un chèque à l'ordre de « Colloque de génie agroalimentaire », à l'attention de :

Prof. Roger Thériault
Département des sols et de génie agroalimentaire
Université Laval
Sainte-Foy, Québec
G1K 7P4

Numéro de catalogue : A41-25/2001F
ISBN 0-660-96502-X

Avant-propos

Il nous fait grand plaisir de vous accueillir à la deuxième Journée d'information scientifique et technique en génie agroalimentaire. Suite au succès de la première journée organisée en mars 1999, quelques ingénieurs et étudiantes se sont concertés pour organiser ce deuxième rendez-vous.

La protection de l'environnement et l'innocuité des aliments sont des sujets de grande actualité. On retrouve dans le programme plusieurs communications qui présentent des technologies aptes à améliorer l'environnement et la santé publique. Le thème de la plénière porte d'ailleurs sur la traçabilité des aliments et les implications technologiques pour son implantation. Cette journée est donc une occasion privilégiée, non seulement d'acquérir des informations de pointe résultant de travaux scientifiques et d'applications techniques en ingénierie agroalimentaire, mais aussi de participer à un carrefour d'échange professionnel.

Le présent compte rendu des conférences inclut les textes soumis par les auteurs. Nous avons maintenu une formule souple par laquelle les auteurs pouvaient envoyer un texte court, sous forme de résumé, ou un texte long de plusieurs pages. Vous comprendrez alors pourquoi la longueur des textes varie. Bien qu'il ne soit pas exhaustif, le compte rendu des conférences représente néanmoins un répertoire intéressant de nombreuses recherches ou de développements technologiques récents en génie alimentaire et en génie agroenvironnemental. Vous pourrez bien sûr communiquer avec les auteurs pour connaître plus de détails sur un sujet qui vous intéresse particulièrement.

Les membres du comité organisateur espèrent donc que cette journée sera l'occasion d'échanges fructueux et de nouvelles idées pour l'avenir. En tenant son assemblée générale annuelle en fin de journée, l'Association des ingénieurs en agroalimentaire du Québec nous offre la possibilité de maintenir des liens professionnels tout au long de l'année. Nous souhaitons à tous et à toutes une belle journée.

Philippe Savoie, ing. et agr.
Président du comité organisateur

Comité organisateur

Marie Lou Buteau, ingénieure stagiaire, CRDA

Damien de Halleux, ingénieur, professeur adjoint, SGA

Éric Georgieff, ingénieur, ENV

Mélanie Fournier, étudiante en génie alimentaire, SGA

Jean Gagnon, ingénieur, CRDA

Gaëtan Gingras, ingénieur et agronome, DEDD

Stéphane Godbout, ingénieur, IRDA

Roch Joncas, ingénieur et agronome, IRDA

Richard Laroche, ingénieur, DEDD

Nadia Ouellet, étudiante en génie alimentaire, SGA

Véronique Paris, étudiante en génie alimentaire, SGA

Philippe Savoie, ingénieur et agronome, chercheur, CRDSGC; professeur associé, SGA

Roger Thériault, ingénieur, professeur titulaire, SGA

Affiliation des auteurs et des modérateurs

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
ABE	Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Université McGill
AIAQ	Association des ingénieurs en agroalimentaire du Québec
ALN	Département des sciences de l'alimentation et nutrition, Université Laval
AS	Department of Animal Science, Université McGill
CANMET	Ressources Naturelles Canada, Laboratoire de Varennes
CENTOR	Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau, Université Laval
CNRC	Conseil national de recherche du Canada
CSM	Consumaj Consultants inc.
CRDA	Centre de recherche et de développement sur les aliments, AAC, Saint-Hyacinthe
CRDH	Centre de recherche et de développement en horticulture, AAC, Saint-Jean-sur-Richelieu
CRDBLP	Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc, AAC, Lennoxville
CRDSGC	Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, AAC, Sainte-Foy
CRIQ	Centre de recherche industrielle du Québec
DCT	Dectron inc.
DEDD	Direction de l'environnement et du développement durable, MAPAQ
EE	Enviro-eau inc.
FMV	Faculté de médecine vétérinaire, Université de Montréal
FPBQ	Fédération des producteurs de bovins du Québec
FPVQ	Fédération des producteurs de volaille du Québec
FRP	Food Research Program, AAC, Guelph
FSAC	Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Université McGill
GCHO	Département de génie chimique, Université d'Ottawa
GE	Groupe Envirogain
GPP	Groupe Purin-Pur
GSM	Groupe SM, Experts-Conseil
INRS	Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
LTEE	Laboratoire des technologies électrochimiques et des électrotechnologies, Hydro-Québec
MAPAQ	Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec
MENV	Ministère de l'environnement du Québec
OD	Odotech inc.
PATLQ	Programme d'analyse des troupeaux laitiers du Québec
PSC	Prairie Swine Centre
SCGR	Société canadienne de génie rural
SGA	Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval
SGM	Département de sciences géomatiques, Université Laval
SNC	Groupe SNC-Lavalin Audet

Table des matières

Session plénière (Salle de conférence)

9h00 La traçabilité des aliments, du champ à l'assiette,
par G. Doyon (CRDA) 1

Thème 1 : Gestion des productions végétales
(Salle de formation)

10h25 Ouverture de la session. Modérateur : P.Jutras (SCGR)

10h30 Système de subirrigation sur matelas capillaires pour la production en pépinière,
par J. Boudreau, J. Caron, P. Tardif (SGA) 20

10h45 Water table management for cranberry production in Quebec,
par P. Handyside, M. Hossain, C. Madramootoo (ABE) 21

11h00 Description holistique des systèmes de culture et conception d'une base de données spatio-temporelle pour les simulations multi-modèles,
par R. Lagacé, É. Assoumou (SGA), Y. Bédard (SGM) 22

11h15 Weed and nitrogen stress detection in corn using airborne hyperspectral remote sensing,
par P.K. Goel, S.O. Prasher, J.A. Landry, R.M. Patel, R.B. Bonnell, A.A. Viau, J.R. Miller (ABE) 24

11h30 Application of data mining for image classification in remote sensing,
par C.-C. Yang, S. O. Prasher, P. K. Goel, R. Patel (ABE) 33

11h45 Modèle d'infiltration d'air dans les silos horizontaux en fonction de la couverture,
par V. Kuzin (SGA), P. Savoie (CRDSGC) 41

Thème 2 : Séchage des aliments
(Salle de l'auditorium)

10h25 Ouverture de la session. Modératrice: C. Vachon (CNRC)

10h30 Advances in heat-pump drying of agri-food products,
par V. Sosle, G.S.V. Raghavan (ABE), R. Kittler (DCT) 52

10h45 Séchage de la drêche dans un séchoir à lit fluidisé pulsé,
par M. G. Poirier, T. Kudra, R. Platon (CANMET) 53

11h00 Principles and applications of osmotic dehydration,
par S. Grabowski, M. Marcotte (CRDA) 54

11h15 Osmotic drying kinetics of apple slices,
par N. van Nieuwenhuijzen, M. R. Zareifard, H. S. Ramaswamy (FSAC) 59

11h30 Évaluation des méthodes de séchage sur des canneberges pré-déshydratées par osmose,
par C. Beaudry, G.S.V. Raghavan, C. A. Madramootoo (ABE) 60

11h45 Modèle numérique pour la simulation de la lyophilisation: optimisation et étude de l'impact de certains paramètres,
par S. Khalloufi, C. Ratti (SGA) 61

Thème 3 : Informatique et contrôle en agroalimentaire

(Salle de conférence)

10h25 Ouverture de la session. Modérateur : W. Pelletier (SGA)

10h30 Analyse et gestion des données de rendement - bilan de trois années,
par B. Panneton, M. Brouillard, T. Piekutowski (CRDH) 64

10h45 Machine-learning assisted knowledge acquisition for lactation curve analysis in dairy farming,
par D. Pietersma, R. Lacroix, K. Wade (AS), D. Lefebvre (PATLQ) 75

11h00 Complex decision making for autonomous agricultural systems,
par R. Kok (ABE) 76

11h15 Développement d'une chambre pressurisée pour l'étude du comportement des insectes,
par B. Goyette, C. Vigneault, G. Boivin (CRDH) 77

11h30 La eLogistique : fiction ou réalité.
par S. D'Amours (CENTOR) 78

11h45 Nouveaux développements dans la modélisation et l'optimisation des procédés,
par J. Thibault (GCHO) 86

Thème 4 : Gestion et traitement des lisiers
(Salle de l'auditorium)

13h25 Ouverture de la session. Modérateur : D. Lemelin (MAPAQ)

13h30 Surplus de déjections animales au Québec,
par C. Émond, J. Roy, P. Vallée (MENV) 90

13h45 Traitement des lisiers de porcs avec la solution Biofertile,
par C. Dutil, S. Blaney, Y. Comeau (GE) 91

14h00 Traitement du lisier de porc par le procédé de biofiltration sur support organique BIOSOR[MD],
par N. Turgeon, G. Buelna, Y. Bernard (CRIQ) 95

14h15 Purin-Pur, un procédé entièrement mécanique de traitement de lisier,
par J. R. Lasnier (GPP) 96

14h30 Traitement de solides de lisier de porc par oxydation humide assistée par plasma,
par C. B. Laflamme, J. Meunier (LTEE), R. Joncas, D.-Y. Martin, M. Côté (IRDA) 100

14h45 Traitement anaérobie à température ambiante du lisier de porc,
par G. Laganière (GSM) 101

Thème 5 : Chauffage et cuisson des aliments
(Salle de formation)

13h25 Ouverture de la session. Modératrice : V. Paris (SGA)

13h30 État de l'art en cuisson des produits amylacés,
par M. Marcotte (CRDA) 104

13h45 La cuisson ohmique des produits carnés a-t-elle un avenir ?
par G. Piette, M. L. Buteau (CRDA), D. de Halleux (SGA), M. Dostie (LTEE), H. Ramaswamy (FSAC), Y. Raymond (CRDA) 110

14h00 Ohmic heating of ham emulsions,
par L. Chiu, H.S. Ramaswamy (FSAC), G. Piette (CRDA) 111

14h15 Radio frequency heating of viscous foods,
par G.W. Awuah, H.S. Ramaswamy (FSAC), P. Piyasena, C. Defelice (FRP) 112

14h30 Thermal process modeling using neural networks,
par C. Chen, H.S. Ramaswamy (FSAC) 113

14h45 Porosity and pore size distribution in fried chicken meat,
par L. Kassama, M.O. Ngadi (ABE) 114

Thème 6 : Traitement, emballage et entreposage

(Salle de conférence)

13h25 Ouverture de la session. Modérateur : C. Vigneault (CRDH)

13h30 La technologie des cellules immobilisées pour la production d'ingrédients et de cultures bactériennes destinés à l'industrie alimentaire,
par C. P. Champagne, N. J. Gardner (CRDA) 116

13h45 Development of a new permittivity analyzer at two ISM frequencies using cavity perturbation technique,
par M.S. Venkatesh, G.S.V. Raghavan (ABE) 117

14h00 Élaboration et mise au point d'un nouveau concept d'emballage alimentaire : contrôle de la perméabilité à l'eau, aux gaz et aux composés organiques volatils,
par I. Lahlou (ALN), J.-P. Émond (SGA) 129

14h15 Sélection d'un emballage pour le transport des produits carnés frais dans le Grand Nord,
par F. Ah-Waye, D. de Halleux, J.-P. Émond (SGA) 134

14h30 Effet de la durée du prérefroidissement sous vide sur la conservation de la qualité de la laitue,
par T. J. Rennie, C. Vigneault (CRDH), G.S.V. Raghavan (ABE) 135

14h45 Développement d'un système de contrôle avancé pour l'entreposage en atmosphère contrôlée,
par N. R. Markarian, C. Vigneault, Y. Gariépy (CRDH) 136

Session semi-plénière (Salle de l'auditorium)

15h15 ASAE ¼ scale tractor design competition,
par A. Alary (SGA), P. Nieuwenhof (ABE) 137

Thème 7 : Mécanisation agricole

(Salle de formation)

15h40 Ouverture de la session. Modérateur : B. Panneton (CRDH)

15h45 RÉCUPAIR : nouvelle approche pour la pulvérisation d'arbres fruitiers,
par R. Thériault (SGA), B. Panneton, B. Lacasse (CRDH) 140

16h00 Développement d'une récolteuse de choux,
par R. Chagnon (CRDH) 147

16h15 Développement d'équipements pour les cerises de terre,
par R. Chagnon (CRDH) 149

16h30 Évaluation de capteurs de rendement dans une fourragère,
par P. Savoie (CRDSGC), S. Allard, R. Thériault (SGA) 150

16h45 Manipulation des andains pour la récolte du foin destiné à la commercialisation,
par Y. Tremblay, S. Dubreuil (SGA), M. Khelifi, P. Savoie (CRDSGC) 153

Thème 8 : Odeurs et fumiers

(Salle de l'auditorium)

15h40 Ouverture de la session. Modérateur : D. Choinière (CSM)

15h45 Développement d'outils pour la mesure d'odeurs d'origine agricole,
par F. Croteau, D. Massé (CRDBLP), T. Pagé (OD) 164

16h00 Réduction des odeurs et des émissions gazeuses provenant des bâtiments porcins,
par S. Godbout, R. Joncas (IRDA), S. P. Lemay (PSC), J.-P. Larouche (IRDA), A. Marquis (SGA), D. Massé (CRDBLP) 166

16h15 Modélisation dynamique des flux d'azote dans les sites d'exploitation porcine,
par P. Berthiaume, M. Bigras-Poulin (FMV), A. N. Rousseau (INRS) 169

16h30 Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux : approche expérimentale,
par R. Joncas (IRDA), G. Gingras, C. Jobin (DEDD), M. Côté (IRDA) 171

16h45 Évaluation des impacts sur les sols et l'eau souterraine de l'entreposage au champ de fumiers de bovins et de volailles,
par G. Fortin, A. D'Astous (EE), A.-M. Christen (FPBQ), P. Fréchette (FPVQ) 172

Thème 9 : Technologie de traitement

(Salle de conférence)

15h25 Ouverture de la session. Modératrice : N. Ouellet (SGA)

15h30 Le virage technologique dans les abattoirs (partie 1),
par C. Tessier (SNC) 174

15h45 Le virage technologique dans les abattoirs (partie 2),
par L. Vanden-Abeele (CRIO) 174

16h00 High pressure treatment of milk in cheese making,
par P.K. Pandey, H.S. Ramaswamy (FSAC), D. St-Gelais (CRDA) 180

16h15 Pulsed electric field pasteurization of foods,
par M. Ngadi (ABE) 181

16h30 Application de l'électrodialyse avec membranes bipolaires à des systèmes alimentaires,
par L. Bazinet, D. Ippersiel, F. Lamarche (CRDA) 182

16h45 Microwave Assisted Extraction Technology in Nutriceutical,
par J. Dai, G.S.V. Raghavan (ABE) 190

Journée d'information

scientifique et technique **en génie agroalimentaire**

Résumés et communications

présentés le 21 mars 2001

SUCCÈS DE LA TRAÇABILITÉ DES ALIMENTS, DU CHAMP À L'ASSIETTE... UNE NÉCESSITÉ EN AGRO-INDUSTRIE!

Gilles Doyon[1], Alain Clément[1], Marco Lagimonière[1], Pierre Veilleux[2]

[1]Centre de recherche et de développement sur les aliments (CRDA), Agriculture et Agroalimentaire Canada, 3600 boulevard Casavant Ouest, St-Hyacinthe, Québec , J2S 8E3
< doyong@em.agr.ca >

[2]Conseil canadien du commerce électronique (CCCE), 7800 boulevard Métropolitain Est, bur. 100, Anjou, Québec

RÉSUMÉ

Notre objectif est de démontrer, pour tout le secteur agroalimentaire, l'importance des technologies, de l'ingénierie, des sciences agronomiques et de la maîtrise des notions de la Qualité et des systèmes (ISO, HACCP) pour maintenir la compétitivité du secteur et un approvisionnement interne et mondial de haute valeur nutritive et sanitaire en provenance de nos provinces et du Canada, et ce, en incluant nos importations. La compréhension des technologies et de l'ingénierie relatives aux usines ainsi que des principales tendances sont traitées. Des notions avancées en qualité et normes relatives aux aliments sont aussi discutées en relation avec les systèmes d'identification et de traçabilité. De plus, les besoins, les législations et les priorités en R/D sont présentés brièvement. On termine par le volet contrôle des gouvernements et agences. En conclusion, on traite des facteurs du succès technologique, des attitudes des consommateurs et finalement l'ingénieur(e), ses compétences et la réussite.

INTRODUCTION : CROISSANCE DE LA PRODUCTION ET DES ÉCHANGES

L'agriculture, activité fondamentale de toutes les civilisations humaines depuis des millénaires, a connu dans les cinq dernières décennies des mutations spectaculaires partout dans le monde. On pensera à la modernisation technique et informatique, les ouvertures commerciales intra et inter-continents, la diversification des productions aux champs et aux cultures abritées qui ont favorisé une croissance rapide des volumes. Mentionnons que depuis 1970 jusqu'en 1990, la production agricole brute mondiale a augmenté de 2,3 % par an. Les produits concernés sont essentiellement : le blé, le riz, le maïs, les oléagineux, les viandes, les produits laitiers, les fibres textiles ou encore les fruits et légumes. Il n'y a eu qu'une faible hausse des surfaces cultivées (+ 0,4 %), mais la hausse des rendements (+10 quintaux / ha) en est la principale responsable.

L'agriculture, sa modernisation et ses produits à valeur ajoutée et améliorée restent donc des enjeux fondamentaux, même si son poids économique direct est maintenant moindre (elle représente moins de 10 % du Produit Mondial Brut). Cependant, c'est l'activité mondiale la plus commune : plus d'un milliard cent millions d'hommes et femmes travaillent la terre.

L'effet pervers principal de toutes les modernisations agroalimentaires a été et continue d'être la dégradation de la relation d'équilibre entre l'agriculture et son environnement. Il y a intensification de la pollution de l'air, des eaux et des terres sans compter l'érosion et la sur-exploitation des ressources et du bien-être animal. Tout ne va pas pour le mieux!

Qu'on se souvienne que, dans nos pays industrialisés, 70 à 80 % des aliments consommés ont subi une transformation industrielle. Le secteur dit industriel est devenu le premier débouché de l'agriculture, et ce, mondialement. Ce secteur représente le plus souvent plus de 10 % des emplois industriels.

Dans une vision locale, nationale ou internationale de compétitivité féroce, la réussite se mesure souvent avec la capacité des entreprises, des sociétés et des pays à orienter la recherche, le développement, l'adaptation des technologies, des connaissances à des produits commerciaux ou commercialisables avec projection de vente ou encore de devenir les leaders tout simplement.

PRODUCTION ET INNOVATION

Préoccupations des entreprises

L'entreprise ou l'organisme doit bien identifier sa mission, sa raison d'être et ses clients. On dessert un marché donné où innover est essentiel tout en observant des contrôles sur les coûts, la qualité, les délais et son niveau de flexibilité, et ce, en satisfaisant des besoins grandissants des clients.

Les structures de nos PME et PMI nous montrent parfois l'inexistence ou la précarité de la fonction R/D. Cette dernière est souvent associée au groupe des Contrôle Qualité (CQ) et d'Assurance Qualité (AQ). La culture R/D si vous me le permettez est généralement décimale avec peu de professionnels dans les entreprises, mais la situation s'améliore!

De notre côté, sommes-nous bien formés à penser et agir R/D? La réponse se doit d'être positive.

Pertes alimentaires et non-qualité

Notre but est de maintenir la créativité, supporter l'effort de R/D des PME et comprendre l'environnement interne et la logistique propre aux divers secteurs d'influence sur la qualité et la durée de vie des produits.

Chacun joue son rôle avec professionnalisme et connaît bien ses limites de responsabilité. Les pertes semblent inévitables et s'étendent de la production jusqu'au consommateur, pouvant être de l'ordre de 25 à 30 % des volumes (pour les végétaux, cela représentant 1,5 milliard $ EU/an). L'étendue des pertes peut varier de 14% des volumes pour les pommes à 80 % des volumes pour les bananes. Pour les légumes, on estime ce chiffre entre 10 à 15 % des volumes avec des étendues de 5 à 95 % pour certaines racines/tubercules. Globalement aux États Unis, les pertes alimentaires au niveau du détail sont de 5,4 milliards de dollars (c'est-à-dire 2 % des approvisionnements). Au niveau des consommateurs et services alimentaires (HRI), ces pertes

se chiffrent à 91 milliards de livres d'aliments (c'est-à-dire 26 % des approvisionnements). En gros, les produits laitiers et végétaux représentent 50 % des pertes au détail; les viandes, volaille et poisson 8,5 %; fruits/légumes transformés 8,6 % et le lait liquide 18,1 %. Du côté du sirop d'érable, les rejets pour mauvais goûts / saveurs sont de plus de 7 millions de livres (9 % des barils défectueux) et représentent 17 millions de dollars. Nous produisons 439 millions de douzaines d'oeufs en coquille qui valent 550 millions annuellement et les pertes sont de < 5 %.

On estime que les coûts de la non-qualité peuvent globalement représenter entre 5 à 25 % du chiffre d'affaires des entreprises. Bien entendu, on ne parle pas des clients perdus en cours d'année pour des produits et des services plus ou moins constants en qualité ou carrément inacceptables.

Pérennité et choix stratégiques

Comment l'entreprise assure sa pérennité est souvent plus ou moins bien connu, mais nous savons qu'en plus de l'intuition, il y a une structure ou un processus mal mesuré que sont la quête et l'analyse de l'information. Cette fonction est l'intelligence compétitive, économique... qu'on appelle la *veille stratégique* et qui est essentielle.

Confrontées à l'évolution accélérée de l'investissement technologique et de sa diffusion, à la mondialisation des marchés et de l'intensification de la concurrence internationale, les entreprises savent que leur développement, voire leur survie, passe par l'excellence de leur métier.

Les entreprises doivent définir avec discernement les technologies essentielles qu'elles doivent développer et maîtriser à l'interne, et celles qu'il est possible d'acquérir à l'externe et qu'elles doivent être capables d'exploiter avec profits par la suite.

Recherche et terminologie

La recherche peut se définir comme étant un effort de l'esprit pour trouver des connaissances nouvelles, pour étudier une question ou un phénomène précis. On parle aussi de l'ensemble des travaux, des activités intellectuelles qui tendent à la découverte de connaissances et de lois nouvelles. La recherche est dite pure (*fondamentale*) et appliquée (*technique*).

Qu'on se rappelle que la recherche dite *fondamentale* contribue à élaborer de nouveaux concepts, de nouvelles méthodes, de nouvelles théories mieux connus sous le nom de *connaissances de base*. Cette recherche et cette quête se font sans que la créativité soit bridée par une obligation de déboucher à court terme sur des technologies ou des procédés industriels nouveaux, et ce, avec ou sans l'esprit de commercialisation. Dans bien des cas, les activités et les connaissances acquises demeurent à l'*état de solution* ou en attente de problèmes à résoudre ou à élucider.

Connaissance intégrée et fonctionnelle des technologies et usines alimentaires

Les produits agricoles et alimentaires frais et transformés sont loin d'être stables indéfiniment et ont des limites de durée de vie. La connaissance des mécanismes de contrôle et de maîtrise des

pertes causées par les microorganismes, la sénescence naturelle, les dommages physiques, les pertes de poids, la modification sensorielle, les abus environnementaux (température et humidité relative), les contaminants, les modifications chimiques, biologiques, les maladies physiologiques, les insectes, les rongeurs et bien souvent les humains est essentielle.

Face à divers problèmes de qualité et stabilité des produits, une panoplie de technologies existe et peut être intégrée dans le flux de production et de marchandisage. On se doit d'évaluer les risques sous les trois angles suivants : les risques biologiques (microorganismes), chimiques et physiques dans nos choix technologiques, les flux d'usine et le système qualité.

Il existe de nombreux livres, revues scientifiques et informations techniques industrielles sur les principales technologies / procédés en alimentaire. En voici une liste par famille ou groupe associé :

1. Séchage et déshydratation
2. Pasteurisation et stérilisation
3. Cuisson et extrusion
4. Réfrigération et surgélation
5. Concentration / évaporation
6. Filtration, séparation / technologies de membranes
7. Utilisation des électrotechnologies et hautes pressions
8. Radiations ionisantes, infrarouge, micro-ondes, UV
9. Contrôles de l'environnement gazeux
10. Fermentation et biotechnologies
11. Formulation, pH sélectif, additifs, les humidités intermédiaires
12. Entreposage, manutention, conditionnement, emballage et transport

Les technologies clés

1. Leurs caractéristiques et critères de sélection

Généralement, les technologies clés se caractérisent par leur originalité et l'innovation dans l'approche du problème à résoudre. Elles se rapprochent des sciences humaines et sociales. On vise de plus en plus à avoir dans son milieu (organisationnel et industriel) des hommes et des femmes avec *la capacité à assimiler et utiliser les nouveaux outils.*

Finalement, l'étudiant y trouvera peut-être une motivation ou une vocation de R/D, l'universitaire et le chercheur des opportunités d'applications de ses recherches, et nos industriels heureux qu'on les appuie.

Les questions suivantes devraient vous aider dans votre choix et l'identification de nos vrais besoins technologiques et d'ingénierie pour la mondialisation :

1. Quels sont les enjeux économiques actuels et futurs ?
2. Est-ce qu'il y aura un impact direct sur le commerce national et extérieur ?
3. Est-ce qu'il y a ou aura une incitation ou rejet social à son égard ?

4. Est-ce qu'on a un intérêt pour maintenir ou obtenir une position concurrentielle / stratégique (a) ? et sa maîtrise confère-t-elle un avantage compétitif (b) ?
5. Existe-t-il une vulnérabilité et un risque de dépendance industrielle ? Y aurait-il un contrôle étranger si on ne le possédait pas ?
6. Est-ce qu'on contribue à satisfaire des besoins collectifs « de société », c'est-à-dire alimentaire, santé, environnement, énergétique, de sécurité et de culture ?
7. Y a-t-il un intérêt ou s'articule-t-il bien avec des intérêts industriels complémentaires (échelle locale et nationale) ?
8. Est-ce que la technologie a la capacité de se diffuser facilement et globalement à l'industrie (échelle nationale) ? Donc facilement acceptée et appropriée.

2. Les tendances par grands domaines

La santé et l'environnement

- décontamination et réhabilitation des sols pollués
- épuration biologique des eaux et traitement des boues
- inertage et stockage des déchets / tri et recyclage
- traitement et contrôle de la qualité de l'eau potable
- batteries plus efficaces et plus légères
- diminution de consommation du carburant fossile et du bruit
- cellules photovoltaïques (« PVC »)
- traitement des fumées et résultats de combustion
- gestion des ressources : l'air et l'eau / sols
- procédés de séparation des membranes
- biotechnologies / ingénierie
- recyclage (polymères...)
- extraction
- séparation et purification

Les biens de consommation

- conservation des aliments (technologie et ingénierie)
- nettoyage sans effluents
- recyclage des déchets / valorisation
- échange des données informatisées (EDI)
- réseaux neuronaux
- étiquette et codage électronique
- analyse d'image / vision artificielle
- mise en oeuvre de la qualité : Processus Qualité, Traçabilité et Innocuité
- standardisation sensorielle
- prototypage rapide / modélisation
- robotique industrielle / analytique
- capteurs intelligents / bases de données
- réduction de la masse et du bruit

Les technologies, ingénierie et systèmes d'accompagnement

La compétitivité des entreprises industrielles dépend, pour une large part, non seulement de la maîtrise des technologies essentielles dites « dures » aux domaines de leurs activités, mais également de l'efficacité de leur stratégie et de la gestion des processus : conception, production et commercialisation. Donc réagir rapidement aux modifications de la demande et de l'environnement concurrentiel, pour capitaliser son savoir-faire, développer ses compétences, et pour innover. On peut les grouper en cinq finalités :

- acquisition et gestion de l'information (recherche, analyse, synthèse et utilisation)
- conception (gestion de projets, analyse de la valeur, ergonomie, design)
- organisation et gestion du processus de production (aspects socio-organisationnels, maîtrise de la production, intégration des connaissances, logistique, santé et sécurité)
- connaissance de la demande (connaître les clients et la démarche Qualité)
- traçabilité (quoi, comment, type d'information...)

TERMINOLOGIE OFFICIELLE LIANT LA TRAÇABILITÉ AUX NORMES ISO ET CODEX ALIMENTARIUS (HACCP)

ISO 8402

La qualité et sa définition sont différentes pour chacun et chacune d'entre nous, ou du moins leur perception en est différente. Une norme internationale, connue jusqu'à récemment sous le numéro ISO 8402, standardise ou établit la base officielle des terminologies qui nous amène à la traçabilité. Cette norme est celle présentement en vigueur au Canada (CCN, 2001). Au niveau international, elle a été remplacée récemment (le 8 décembre 2000) par la norme ISO 9000:2000 (ISO, 2001). Il n'y a pas de compromis sur ces notions fondamentales. Au tableau 1, on trouve quelques définitions importantes concernant la qualité et la traçabilité.

Tableau 1. La qualité : définitions importantes (ISO 8402:1994).

1.1 **entité**: *«ce qui peut être décrit et considéré individuellement»*. Une entité peut être, par exemple une activité ou un processus (1.2), un produit (1.4), un organisme (1.7), un système ou une personne, ou une combinaison de l'ensemble ci-dessus.

1.2 **processus ou procédé**: *«ensemble de moyens et d'activités liés qui transforment des éléments entrants en éléments sortants»*. Ces moyens peuvent inclure le personnel, les finances, les installations, les équipements, les techniques et les méthodes.

1.3 **procédure**: *«manière spécifiée d'accomplir une activité»*. Dans de nombreux cas, les procédures sont exprimées par des documents (par exemple, procédures d'un système qualité). Lorsqu'une procédure est exprimée par un document, le terme *«procédure écrite»* est souvent utilisé. Une procédure écrite comporte généralement l'objet et le domaine d'application d'une activité; ce qui doit être fait et qui doit le faire; quand, où et comment cela doit être fait; quels matériels, équipement et documents doivent être utilisés; et comment cela doit être maîtrisé et enregistré.

1.4 **produit**: *«résultat d'activités ou de processus (1.2)»*. Le terme produit peut inclure les services, les matériels, les produits issus de processus à caractère continu, les logiciels, ou une combinaison des deux. Un produit peut être matériel (par exemple, assemblages ou produits issus de processus à caractère continu) ou immatériel (par exemple, connaissances ou concepts), ou une combinaison des deux. Un produit peut être soit intentionnel [par exemple, une offre aux clients (1.9)], soit non intentionnel (par exemple, un polluant ou des effets indésirables).

1.7 **organisme**: *«compagnie, société, firme, entreprise ou institution, ou partie de celles-ci, à responsabilité limitée ou d'un autre statut, de droit public ou privé, qui a sa propre structure fonctionnelle et administrative»*. La définition ci-dessus s'applique aux normes qualité. Le terme *«organisme»* est défini différemment dans le Guide ISO/CEI 2.

1.8 **organisation**: *«responsabilités, liaisons hiérarchiques et relations agencées selon une structure permettant à un organisme (1.7) d'accomplir ses fonctions»*.

1.9 **client**: *«destinataire d'un produit (1.4) fourni par le fournisseur»*. Dans une situation contractuelle, le client est dénommé *«acheteur»*. Le client peut être, par exemple, le consommateur final, l'utilisateur, le bénéficiaire ou l'acheteur. Le client peut être interne ou externe à l'organisme.

2.1 **qualité**: *«ensemble des caractéristiques d'une entité (1.1) qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites»*.

3.16 **traçabilité**: *«aptitude à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité (1.1) au moyen d'identifications enregistrées»*.

Qualité: précisions essentielles

Dans une situation contractuelle, ou dans un environnement réglementé, tel que le domaine de la sécurité nucléaire, les besoins de qualité ont spécifiés, tandis que dans d'autres, il convient d'identifier et de définir les besoins implicites.

Dans de nombreux cas, les besoins peuvent évoluer avec le temps; ceci implique la revue périodique des exigences pour la qualité. Les besoins sont habituellement traduits en caractéristiques avec des critères spécifiés (voir les exigences pour la qualité). Les besoins peuvent inclure, par exemple, des aspects de performance, de facilité d'emploi, de sûreté de fonctionnement (disponibilité, fiabilité, maintenabilité), de sécurité, des aspects relatifs à l'environnement (voir les exigences de société), des aspects économiques et esthétiques.

Il convient que le terme «*qualité*» ne soit utilisé isolément ni pour exprimer un degré d'excellence dans un sens comparatif, ni pour des évaluations techniques dans un sens quantitatif. Pour exprimer ces deux sens, il est bon qu'un qualificatif soit utilisé. Par exemple, on peut employer les termes suivants: a) «*qualité relative*» lorsque les entités sont classées en fonction de leur degré d'excellence ou d'une manière comparative (à ne pas confondre avec classe); b) «*niveau de qualité*» dans un sens quantitatif (tel qu'employé dans le contrôle par échantillonnage) et «*mesure de la qualité*» lorsque des évaluations techniques précises sont effectuées.

L'obtention d'une qualité satisfaisante implique l'ensemble des phases de la boucle de la qualité. Les contributions à la qualité de ces différentes phases sont parfois considérées séparément pour les distinguer; par exemple, qualité due à la définition des besoins, qualité due à la conception du produit (1.4), qualité due à la conformité, qualité due au soutien du produit tout au long de son cycle de vie.

Dans certains textes existants, on identifie la qualité à «*l'aptitude à l'usage*», ou à «*l'aptitude à l'emploi*», ou à «*la satisfaction du client (1.9)*» ou à «*la conformité aux exigences*». Ces notions ne représentent que certaines facettes de la qualité, telle que définie ci-dessus.

Traçabilité : applications diverses

Le terme «*traçabilité*» peut être utilisé dans trois acceptations principales : par rapport à un produit, par rapport à l'étalonnage et par rapport à la collecte de données. Lorsqu'il se rapporte à un produit (1.4), le terme peut se référer soit à l'origine des matériaux et des pièces, soit à l'historique des processus (1.2) appliqués au produit, soit à la distribution et l'emplacement du produit après livraison. Lorsqu'il se rapporte à l'étalonnage, le terme traçabilité s'applique au raccordement des équipements de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, aux étalons primaires, aux constantes et propriété physiques de base ou matériaux de référence. Lorsqu'il se rapporte à la collecte de données, il relie les calculs et les données générés tout au long de la boucle de la qualité, en remontant parfois aux exigences pour la qualité pour une entité.

Il convient que tous les aspects concernant les éventuelles exigences de traçabilité soient clairement spécifiés, par exemple en termes de période couverte, point d'origine ou identification.

Guide HACCP (Analyse des risques et contrôle/maîtrise des points critiques)

Dans le but d'assurer l'innocuité des produits alimentaires, le Codex Alimentarius (WHO, FAO) décrit les lignes directrices pour la mise en place d'un système efficace de procédures qui fait référence mondiale. On peut trouver des informations additionnelles sur le Codex Alimentarius en consultant le site de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2001), notamment http://www.fao.org/es*/esn/codex.

Aux États-Unis, le U.S. Food and Drug Administration (2001) tient à jour un site internet (http://vm.cfsan.fda.gov/~lrd/haccp.html) sur lequel on peut trouver le guide HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point principles and application guidelines). Au Canada, ces principes sont appliqués par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA, 2001), notamment par son Programme d'amélioration de la salubrité des aliments (PASA, qu'on retrouve sur le site de l'Agence, http://www.cfia-acia.agr.ca).

On peut trouver l'énoncé des sept principes d'un plan HACCP, en français, sur le site du U.S. FDA (http://vm.cfsan.fda.gov/~mow/fhaccppr.html). Selon le U.S. FDA, le plan HACCP doit identifier:

«i. Les dangers à l'alimentation qui peuvent se produire (PRINCIPE HACCP #1). Ceux-ci comprennent toutes les conditions pouvant entraîner un aliment à devenir dangereux en vertu de l'acte, par exemple les toxines, micro-organismes, produits chimiques, pesticides, résidus pharmaceutiques, dangers physiques, décomposition.

ii. Points de contrôle critiques (ccp) pour le contrôle des situations dangereuses qui peuvent se produire à l'intérieur et à l'extérieur des usines de traitement (PRINCIPE HACCP #2).

iii. Limites critiques (c'est-à-dire les paramètres de fonctionnement en sécurité) pour les ccp's. (PRINCIPE HACCP #3).

iv. Procédures de contrôle (PRINCIPE HACCP #4)

v. Plans d'actions correctrices éventuels (PRINCIPE HACCP #5)

vi. Procédures de vérification (PRINCIPE HACCP #6). Deux objectifs sont visés: assurer que le plan HACCP est mis à jour au moins une fois par an et assurer que l'implantation continue est satisfaisante.

vii. Tenue de dossiers. Système de documentation de contrôle, actions correctrices et de certaines procédures de vérification. (PRINCIPE HACCP #7). Le plan doit être signé/daté par un représentant officiel de la société. Ceci doit se faire initialement, pour chaque modification et au moins une fois par an.»

Donc, connaître ces procédés de fabrication, les utilisations prévues, établir son diagramme de flux, définir ces points critiques (CCP) en ayant à l'esprit les risques chimiques, biologiques et physiques (BCP) réels ou potentiels. On corrige au besoin et on peut en faire la preuve (traçabilité).

LES SYSTÈMES D'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE (« AIS »)

Code à barres («BC») i.e. UPC* EAN** CCCE***
Reconnaissance optique de caractères («OCR»)
Procédures Biométriques («BP») i.e. ident. personnes, ex.: empreintes, voix, rétine (iris)
Cartes à puce intelligente («SC»), i.e. téléphone, 1984
Identification par radio fréquence («RFID»)

- transpondeur
- transport public téléchargé

* UPC : Universal Product Code, E.U.A.
** EAN : European Article Number (Épicerie, 1976), 13 nombres, U.E.
*** CCCE : Conseil Canadien du Commerce Électrique

Les principales composantes

- L'environnement
- Les procédures et les contrôles
- Le personnel
- L'entreposage et la distribution (interne et externe)

Succès

« La psychologie et le facteur humain sont plus importants que la technologie »
R. Duris, Chicago, 2000

Dans nos locaux

- Description complète «Layout Facility Design»
  - ✓ Grosseur : surface utile, surface totale, hauteur utile, hauteur totale, matériaux, diagramme des flux.
- Observations critiques
  - ✓ Congestion, dommage des appareils et produits, blessures, bruit et sécurité.
- Mouvements
  - ✓ Carriste, «Lifts», convoyeur, élévateur, tapis roulant.

- Profils des produits

- Localisation des sites d'entreposage
  - ✓ Plancher et surface
  - ✓ Palettisation et flux
  - ✓ Carton et flux
  - ✓ Tote, bris et flux
  - ✓ Tablettes, carrousels

- Autres considérations
  - ✓ Durée de vie totale
  - ✓ Lot et code à barres
  - ✓ Numéro de série
  - ✓ Produits de saison
  - ✓ Autre

Éxécution logistique

- Priorité des tâches par employé, unité de transformation

Profil des équipements
1. Profil des matériaux
3. Profil de localisation
4. L'opérateur/Équipement personnel (choix)
5. L'opérateur/Priorités des tâches
6. Standardisation du travail et différentiation

- Localisation des étiquettes et codes

1. Types d'étiquettes (identifiants)
2. Localisation
3. Plaque numéralogique

Collecte/Cueillette
5. Action prise et correcte
6. Transfert/Expédition

Applications

- Identification animale
- Outillage, équipements
- Conteneurs
- Antivol
- Transports publics, etc.
- Automatisation industrielle :
  production, station de travail
  information sur le travail à faire,
  mesure de qualité
  contrôle centralisé ou décentralisé

Bénéfices

«t» opérateur □55 % et déplacement de □15 %
«$» opération □55 % ramassage

- Meilleure gestion «coordination» du flux de matériel et des opérations (intrant-extrant)

- Contrôle de la qualité
  - ✓ Au site direct du travail
- Système de sécurité
  - ✓ En ligne : microprocesseur, ordinateur
  - ✓ Système central
- Sécurité des données
- Environnement sévère, dangereux, froid
  i.e. à l'épreuve de l'eau et de la poussière
- Entreposage et distribution
- Traçabilité complète

Description globale des opérations

- Activités
  - Réception
  - Préparation
  - Expédition
- Ressources
  - ✓ Humaines et physiques, gestion/informatique
- Collecte de données
  - ✓ Quand et comment?

Services d'identification des produits

L'industrie a développé une panoplie de technologies pour l'identification des produits et le commerce électronique. Au niveau des technologies, on peut consulter par exemple les sites de Hand Held Products (2001), E-Labeling (2001), Infinite Corporate Solutions (2001), Protech Systems (2001), etc.

Au niveau du commerce électronique, une organisme important au Canada est le Conseil canadien du commerce électronique (CCCE, 2001). Les services du Conseil canadien du commerce électronique portent principalement sur le développement et la publication de normes/lignes directrices relatives au commerce électronique (EDI) et les codes à barres. Également, le CCCE assure l'intégrité de l'information pour les transactions et harmonise les protocoles entre les pays. Le CCCE fait partie d'un système international avec les États-Unis, qui est représenté par l'Uniform Code Council, et l'Association internationale de numérotation des articles à Bruxelles représente 89 pays à l'extérieur de l'Amérique du Nord. Une entreprise canadienne qui enregistre ou obtient un numéro d'identification de fabricant est assurée que ce numéro sera accepté partout dans le monde. Le CCCE émet aussi des certifications de conformité via un processus de vérification des codes et produits. Le CCCE est ainsi un organisme à but non lucratif qui touche au commerce, aux communications, à la formation et à la normalisation multisecteur.

LES BESOINS, DES LÉGISLATIONS, DES PRIORITÉS ET LA R/D

Les besoins en traçabilité

Dans la démarche qualité, on parle et utilise couramment les procédures ISO et HACCP pour le contrôle de l'innocuité alimentaire. Ces modèles de gestion sont efficaces pour le volet

traçabilité comme un principe de base des systèmes, sinon on se retrouve en non conformité et des procédures correctives doivent être mises en place. Les risques potentiels sont à trois niveaux : biologique, chimique et physique (BCP). On est en état « proactif » et non passif ou en attente que des problèmes potentiels ou réels se produisent. Comme on le sait, les coûts de la non-qualité sont inacceptables dans nos entreprises concurrentielles à l'échelle mondiale.

La traçabilité a fait son apparition avec la maladie de la vache folle en Europe en 1996, car on se devait de retrouver l'historique, l'utilisation et la localisation d'une entité au moyen d'identifiants.

Pensons au cas de Walkerton avec son eau contaminée, à Perrier avec le benzène, aux manutentionnaires/opérateurs morts dans des silos et fosses diverses?

La traçabilité est un outil scientifique/technique d'amélioration de notre compétitivité nationale et internationale.

Des législations, directives, etc.

Le gouvernement canadien a récemment mis en place un Programme national d'identification des animaux qui oblige tous les producteurs à identifier leurs bovins à la ferme. L'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) indique qu'un tel «*programme national d'identification est essentiel pour conférer à l'industrie et au gouvernement la capacité d'intervenir lorsqu'une maladie ou un problème de salubrité des aliments se manifeste, afin de les confiner et de les éliminer rapidement. C'est pour cette raison que l'industrie a demandé de mettre ce programme sur pied.*»
(http://www.cfia-acia.agr.ca/francais/corpaffr/newcom/20000629f.shtml)

L'Agence canadienne d'identification des bovins (ACIB) pour sa part a pour mandat d'élaborer et d'exécuter des systèmes d'identification et de retraçage des bovins avant qu'ils quittent le troupeau.

Le MAPAQ prépare et finalise la Loi 120 sur la protection sanitaire des animaux.

De plus, la Fédération des producteurs de bovins du Québec (FPBQ) conjointement avec l'UPA jouent un rôle important dans l'application de ces mesures.

Mentionnons qu'un groupe commercial « Protech », spécialiste en identification commerciale, utilise diverses technologies d'identification et de logistique reliées au domaine de la santé alimentaire et animale.

En Europe, la traçabilité indirecte (TI) et par contact (TC) pour le froid reste difficile à mesurer. La Directive 92/1/CEE du 13 janvier 1992 relative aux aliments surgelés a forcé le développement et l'utilisation d'enregistreurs dans les entrepôts, véhicules de transport mais dans les applications pour les produits frais, une norme française (NFE18-150) renforce cette directive.

La Directive 93/43 sur l'hygiène des denrées alimentaires prend en compte la température du produit et des locaux. Toutes ces directives favorisent et sous-tendent l'application des principes de la démarche HACCP, l'élaboration des guides de bonnes pratiques pour chaque profession (voir le Codex).

Tout comme nous, le secteur agroalimentaire français est assujetti aux lois et doit respecter les normes de la Direction des services vétérinaires (DSV) et de la Direction départementale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DDCCRF). Du côté sécurité/innocuité, les entreprises obtiennent des certifications ISO 9002 par des organismes officiels et la même logique pour le HACCP.

Des législations et l'application des principes HACCP sont en force chez nos voisins du sud (É.-U.), ne l'oublions pas.

Des priorités?

Tout le domaine des ressources primaires, *i.e.* l'eau, l'air, le sol, également les végétaux, animaux, poissons qui contribuent par notre conditionnement, nos transformations, l'emballage, la logistique de distribution et de marchandisage à servir d'intrant ou de produit fini.

Développer l'attitude de tolérance « zéro » ou « proche de... » et rendre les gens imputables de leurs actions ou de leurs inactions.

Les besoins en R&D?

Compréhension des systèmes agroalimentaires (production et transformation), logistique du transport, des outils et systèmes de traçabilité intégrée de la ferme à l'exportation ou jusqu'au client.

Adéquation des programmes de financement R&D pour le secteur transport/distribution en collaboration avec les universités et les centres d'expertise locaux et nationaux.

Formation scientifique et technique des gens à tous les niveaux en qualité, traçabilité et système de télécommunication. On parle ISO et HACCP.

UN CONTRÔLE DES GOUVERNEMENTS, AGENCES ET FÉDÉRATION AU CANADA

Au niveau fédéral

Depuis le 1er janvier 2001, la Loi fédérale sur la santé des animaux oblige tout producteur à identifier ses bovins avant qu'ils ne quittent la ferme d'origine en vertu de la partie XV de son règlement (art. 172 à 189).

Ces articles de règlement sont donc en vigueur actuellement, sans mesures coercitives avant le 1er juillet 2002. Nous sommes en phase de sensibilisation de l'industrie et l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) a pour mandat l'application du programme national.

L'Agence canadienne d'identification des bovins (ACIB) est un organisme sans but lucratif constitué en personne morale en 1998 et dont le mandat est d'élaborer et d'exécuter un système d'identification individuelle et de retraçage des bovins au Canada. L'Agence est dirigée par un conseil d'administration composé de représentants de tous les secteurs de l'industrie. Conformément à son mandat, l'ACIB a mis au point un système d'identification individuelle et de retraçage afin d'identifier tous les bovins avant qu'ils ne quittent leur troupeau d'origine.

Au niveau provincial

La loi provinciale du Québec sur la protection sanitaire des animaux couvrira cet aspect par une réglementation qui permettra de rencontrer les exigences fédérales, ceci dans un proche avenir. Le Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) en est le maître d'oeuvre.

Par ailleurs, le MAPAQ (2001) s'est associé récemment avec le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) afin d'instaurer un système de certification unique dans toute la chaîne alimentaire (http://www.agr.gouv.qc.ca/info/cpresse/0114.htm). Il poursuit aussi des efforts de formation tant au gouvernement que dans les entreprises afin de maintenir un haut niveau d'expertise dans le domaine de l'innocuité et la salubrité des aliments (http://www.agr.gouv.qc.ca/ent-7.htm.).

La Fédération des producteurs de bovins du Québec (FPBQ) de l'Union des producteurs agricoles du Québec (UPA) regroupe les membres touchés par ces mesures. Un rôle important fut joué par ces deux organismes dans la sensibilisation des éleveurs de bovins.

RÔLES DES CONSOMMATEURS ET DES INGÉNIEURS

Facteurs de succès

On regroupe facilement les cinq facteurs suivants lors des réussites :

1. la volonté d'action des acteurs du milieu;
2. l'existence d'un leader ou chef de file;
3. la possibilité d'alliances existe ou un potentiel et intérêts réels sont connus;
4. la sensibilité aux mesures incitatives financières et à la réglementation gouvernementale;
5. l'acceptabilité du milieu et sociale.

Attitudes observées des consommateurs

Une première attitude du consommateur favorise le positionnement novateur : c'est-à-dire que le consommateur achète autant à cause de la modernité que de l'usage et attache de l'importance

aux marques. Le produit représente une image sociale et personnelle, donc le consommateur accueille favorablement l'innovation.

Une seconde attitude du consommateur est au contraire contrôlée par un faible intérêt pour l'innovation. On mesure l'utilité effective, la fonctionnalité et la performance d'un produit en égard du prix (principalement, la simplicité d'usage et la sécurité). Et finalement, l'aspect mobilité, *i.e.* portables, téléphonie, matériaux allégés qui est loin d'être négligeable.

L'ingénieur(e) et ses compétences

Une forte compétence technique, des connaissances de procédés, des technologies et transformations courantes en agroalimentaire. Bien entendu connaître le produit « L'Aliment » dans sa généralité. Être capable de créer et développer les machines, équipements, instruments et également des méthodes de contrôle et d'essais. Exceller dans la maîtrise de l'informatique et des contrôles, de transport et de la logistique. Des notions de base des matériaux et leurs propriétés en alimentaire. Cette personne doit être un(e) bon(ne) animateur(e), coordonnateur(trice) et bien souvent le (la) chef de file!

L'ingénieur(e) et la réussite

Être passionné(e) par son domaine, les problématiques locales, nationales et internationales. Établir un réseau de contacts conséquents, faire plusieurs stages en industrie ou associations et agences pour se diversifier et développer de nouvelles expertises ou savoir-faire. Être prêt(e) à s'impliquer et bien souvent parler couramment l'anglais et l'espagnol. Les opportunités sont là!

MOT DE LA FIN

Il y a un impact direct de l'Homme sur son environnement à l'échelle mondiale et sa survie propre comme individu et comme entreprise en dépend. Les produits que nous consommons sont en majorité transformés. Notre réussite est dans la maîtrise des processus et procédés industriels, de la formation scientifique et technique d'individus polyvalents et fonceurs.

La structure et la mission de l'Entreprise (*i.e.* industrie et gouvernement) se doivent d'être souples et pensées avec une orientation client. Développer la culture de R/D dans nos entreprises et pour ce, la formation en génie alimentaire doit faire preuve de leadership. L'identification de cinq grands domaines scientifiques permet de mieux voir le futur immédiat en fonction des facteurs (5) qui guident la réussite tout en n'oubliant pas les attitudes du consommateur et du client.

En espérant avoir pu créer et engendrer un moment de réflexion et avoir démontré l'importance de tous les intervenants du milieu dans la réussite de nos entreprises et qui plus est celle de l'ingénieur(e) en agro-alimentaire.

L'excellence aux échelles locale, nationale et internationale

Notre quotidien nous force et nous entraîne à créer et innover, et ce, particulièrement dans le domaine agro-alimentaire. Partout, on nous parle d'exporter nos produits et notre savoir. En fait, nous n'avons guère le choix si nous voulons être là comme entreprise et société où il fait bon vivre. Notre standard de vie en dépend!

Alors, technologies nouvelles et ingénierie se marient pour réduire les coûts et les pertes, de nouvelles perspectives d'emploi et de nouveaux marchés alors inaccessibles surgissent et sont sous notre contrôle potentiel.

Le Canada est reconnu mondialement pour la qualité de ses aliments et produits à l'échelle planétaire. Le pays détient un peu plus de 3 % du commerce mondial des produits agricoles et alimentaires. Si nous voulons collectivement augmenter notre part de la demande du marché global qui se situerait entre 625 à 745 milliards de $ aux environs de 4 % (25 à 30 milliards en 2005), il faut penser stratégies, moyens, cibler, faire des alliances et être des « leaders » ou chefs de file!

Les entreprises gagnantes doivent s'adapter et aussi bien maîtriser la réglementation de leurs domaines et pour l'agro-industrie, les volets ISO et HACCP. Le commerce national et mondial en est assujetti.

Il nous faut être les meilleurs et nous le pouvons!

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur profonde reconnaissance au Dr B. Paquette, M.V. (ACIA), M. S. Choquette de l'entreprise « Protech identification » et M. C. Hélaine (Servi, France) pour leurs commentaires et vigoureuses discussions.

RÉFÉRENCES

ACIA. 2001. Agence canadienne d'inspection des aliments. 2001 rue University, pièce 746-S Montréal, Qc. H3A 3N2 tél.: (450) 283- 8888; fax: (450) 283-6214. http://www.cfia-acia.agr.ca/.

ACIB. 2001. Agence canadienne d'identification des bovins, 6715 8th Street, Northeast, Calgary, Alberta, T2E 7H7. Tél.: 1-877-909-2333; fax: 1-403-275-1668; http://www.cattle.ca/ccia/.

CCCE. 2001. Conseil canadien du commerce électronique, 7800 boul. Métropolitain est, bureau 100, Anjou, QC, H1K 1A1. Tél.: 514-355-8929; fax: 514-356-3235. http://www.eccc.org/.

CCN (2001). Conseil canadien des normes. Management de la qualité et assurance de la qualité - Vocabulaire. Dernière modification 28 Nov 00. Norme CAN/CSA-ISO 8402-94; ISO 8402:1994. http://ww2.scc.ca/std-fr/std6476.html.

E-Labeling. 2001. Zebra and Eltron thermal transfer bar code tag. http://www.elabeling.com/

FAO. 2001. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Commission du Codex alimentarius. http://www.fao.org/es*/esn/codex.

FPBQ. 2001. Fédération des producteurs de bovins du Québec, 555 boul. Roland-Therrien, Longueuil, Qc. J4H 3Y9. Tél.: 1-450-679-0530; fax: 1-450-442-9348. http://www.upa.qc.ca/federations_ specialisees.html#6

Hand Held Products. 2001. Image based data collection. http://www.handheld.com/

Infinite Corporate Solution. 2001. Bar code products. http://www.infinitecorp.com/

ISO. 2001. Organisation internationale de normalisation. Norme ISO 9000:2000 Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire. Edition: 2. Remplace la norme ISO 8402(1994). Date du stade: 2000-12-08. http://www.iso.ch/catf/withdraw1882.html.

MAPAQ. 2001. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, 200 chemin Sainte-Foy, 11^{e} étage, Québec, Q C, G1R 4X6. Tél.: 1- 418-380-2100; fax: 1-418-380-2169; http://www.agr.gouv.qc.ca/.

Protech Systems. 2001. e-Business solutions. http://www.protech.com/

U. S. Food and Drug Administration. 2001. Hazard analysis and critical control point principles and application guidelines, adopted August 14, 1997. Document HACCP en français sur le site http://vm.cfsan.fda.gov/~mow/fhaccppr.html.

21 mars 2001
10h25 à 12h00

Thème 1 : Gestion des productions végétales

Modérateur : P. Jutras

SYSTÈME DE SUBIRRIGATION SUR MATELAS CAPILLAIRES POUR LA PRODUCTION EN PÉPINIÈRE

Jocelyn Boudreau, Jean Caron et Pierre Tardif

Département des sols et de génie agroalimentaire
Université Laval, Ste-Foy, G1K 7P4
<jboudreau@grr.ulaval.ca>

RÉSUMÉ

La culture en pépinière est une spécialisation de l'agriculture vouée à la production de jeunes arbres destinés à la transplantation. Parmi les innovations importantes adoptées par les pépiniéristes au plan de leurs pratiques culturales se trouve la production en contenant, apparue aux États-Unis dans les années 1950. Les pots sont disposés sur un film de plastique recouvrant le sol et occupent 10 à 20 % de la superficie. Vu le volume restreint de ces contenants, les réserves en eau et en nutriments disponibles pour les arbustes sont faibles. Le substrat a donc tendance à s'assécher relativement rapidement, suivant la demande en évapotranspiration. Pour cette raison, des apports extérieurs d'eau et de fertilisants doivent être faits en grandes quantités. Le système d'irrigation le plus fréquemment utilisé est l'aspersion. Ce type de système est très peu efficace en pépinière en raison de la fraction importante de l'eau appliquée qui retombe entre les pots et qui est ainsi perdue par ruissellement et infiltration dans le sol. Ces eaux contiennent souvent des fertilisants et des pesticides ; elles représentent donc une source potentielle de contamination pour les eaux souterraines et les plans d'eau de surface à proximité des pépinières. Les pertes d'eau entraînent aussi des coûts pour les producteurs. C'est notamment le cas dans les régions où le coût de l'eau est à la hausse à cause de sa rareté ou d'un usage intensif. De plus, il arrive souvent que les producteurs placent côte à côte des espèces différentes ou des plants de même espèce mais n'étant pas au même stade de développement, qui peuvent avoir des besoins en eau extrêmement différents. L'irrigation par aspersion ne permet pas un apport d'eau ajusté aux besoins de chaque plant de sorte que certains peuvent être sur-irrigués tandis que d'autres peuvent être sous-irrigués selon la régie d'irrigation choisie. Pour remédier à ces problèmes, plusieurs années de développement ont mené à la mise au point d'un premier prototype industriel de matelas capillaire. Il s'agit d'un matelas fait de fibres de polyester sur lequel les pots sont déposés. Le matelas absorbe l'eau tombant entre les pots et la redistribue aux plants par remontée capillaire selon les besoins spécifiques de chaque plant. Ce matelas se distingue de ceux utilisés en serre par sa conception en deux couches de capillarité différenciée permettant d'obtenir de bonnes propriétés hydrauliques tout en limitant l'évaporation de l'eau vers l'atmosphère. Lors de tests comparatifs à l'Université Laval, ce système s'est avéré équivalent à un système de récupération et recyclage des eaux de ruissellement avec des économies d'eau approchant 70 % par rapport à l'irrigation par aspersion, et ce sur deux années consécutives. Lors d'une autre série d'essais à l'Université de Floride, le système de subirrigation sur matelas capillaires a permis des économies d'eau de l'ordre de 40 % par rapport à l'irrigation par aspersion et a été légèrement moins performant que la microirrigation. Ces derniers essais ont permis de cerner quelques problèmes quant à la remontée capillaire notamment au niveau du contact entre le substrat contenu dans les pots et le matelas capillaire. Des améliorations sont en cours de développement et d'autres essais sont prévus pour l'année 2001.

WATER TABLE MANAGEMENT FOR CRANBERRY PRODUCTION IN QUEBEC

Patrick Handyside, Manwar Hossain & Chandra A. Madramootoo

McGill University, Brace Centre for Water Resources Management,
Department of Agricultural and Biosystems Engineering,
Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec H9X 3V9
<handyside@macdonald.mcgill.ca>

ABSTRACT :

Cranberry (*Vaccinium macrocarpon* L) production is a highly specialized form of small fruit production, limited for the most part to Canada and the northern United States. The cranberry plant is a wetland crop species that is grown commercially in natural or artificial wetlands managed for crop production. Since cranberry production is mostly water dependent, many unique cultural and management practices have been developed for this production.

Water requirements for cranberry production vary from 15,000 to 25,000 m^3 of water $ha^{-1}y^{-1}$ or as little as 4,000 m^3 $ha^{-1}y^{-1}$ if some of the water is recycled. Water management for cranberry production includes many options. One important option is water table control by the means of sub-irrigation, which has been proven to be an effective technology for agricultural water management. Previous studies have shown that the mean water table depth required for cranberry production ranges from 0.30 to 0.375 m below the soil surface. This depth can be maintained by sub-irrigation, which can replace surface irrigation methods and thus minimize water losses. The sub-irrigation system can also be used for drainage.

Development of a sub-irrigation system as a means of water table management requires the evaluation of various physical and environmental conditions. This was undertaken at four different field sites at St.Louis-de-Blandford, Quebec. The soil types of four fields were a coarse sand, a fine sand and two peat soils respectively. Physical parameters measured included: soil hydraulic conductivity, bulk density, porosity, soil moisture retention characteristics and particle size distribution. These physical properties are necessary to determine water availability and water movement and were used to calculate the field capacity, wilting points, horizontal and vertical movement of water and upward flux of water from the water table. Field measurements of water table depth and moisture content status at weekly intervals over the season were carried out using piezometers and tensiometers each placed at 1.0 m and 0.30 m depth respectively. A water budget for the cranberry crop was developed using local weather station data including total precipitation, potential evaporation and availability of water from local streams. Sub-irrigation systems were designed for each field. A decision support system could be developed to manage water table at the desired depth to alleviate water stress experienced by cranberry plants during the growing season.

DESCRIPTION HOLISTIQUE DES SYSTÈMES DE CULTURE ET CONCEPTION D'UNE BASE DE DONNÉES SPATIO-TEMPORELLE POUR LES SIMULATIONS MULTI-MODÈLES.

Robert Lagacé[1], Étienne Assoumou[1] et Yvan Bédard[2]

[1]Département des sols et de génie agroalimentaire,
Université Laval, Ste-Foy, G1K 7P4 <rlagace@grr.ulaval.ca>
[2]Département de sciences géomatiques,
Université Laval, Ste-Foy, G1K 7P4

RÉSUMÉ :

Avec l'avènement de l'informatique depuis quelques décennies, des progrès considérables ont été réalisés au niveau du développement et de l'utilisation de modèles de simulation des phénomènes physiques naturels, modèles qui sont devenus de plus en plus complexes. Ce fut le cas notamment dans le domaine agricole où une série de modèles de simulation a été développée pour étudier divers phénomènes ou encore pour analyser et quantifier à plus ou moins long terme les impacts des pratiques agricoles sur la productivité, l'économie et l'environnement. L'avènement du développement durable et la nécessité d'utiliser une approche holistique requièrent une analyse simultanée de multiples facettes (agronomique, environnementale, économique, sociale, etc.). Les approches classiques de modélisation et d'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) dans la communauté agricole ne permettent pas de répondre à ces nouvelles exigences. Il semble que la seule façon actuellement réaliste sur le plan technologique d'analyser plusieurs aspects consiste à utiliser simultanément plusieurs modèles de simulation et SIG.

Mais comment réaliser l'utilisation simultanée de plusieurs modèles de simulation le plus efficacement possible et les intégrer à des SIG ? Cet aspect étant peu traité dans la littérature, la présente étude se propose alors de réaliser concrètement une telle intégration de différents modèles de simulation dans une base de données unifiée. Le terme «unifié» est différent de «centralisé», mais réfère plutôt à une normalisation des données pour en faire une base de données intégrée permettant (dans un proche futur) l'interopérabilité des systèmes.

L'objectif de cette étude était de construire une base de données unifiée pour supporter différents modèles de simulation utilisés dans le domaine agricole, en particulier, les modèles reliés aux systèmes de culture. Pour atteindre cet objectif, il est proposé d'évaluer la possibilité de créer une représentation unifiée de l'information utilisée par différents modèles de simulation décrivant les systèmes de culture. La réalisation de cet objectif était basée sur l'hypothèse stipulant qu'en dépit de la complexité des systèmes de culture, les modèles de simulation qui utilisent leur description ont suffisamment de données communes et de concepts communs (itinéraire technique, données climatiques, données liées au sol, aux plantes, etc.) permettant une représentation unifiée et structurée de ces données et concepts dont plusieurs sont spatio-temporels.

La méthode utilisée a consisté à effectuer une analyse de trois modèles de simulation représentatifs: (1) un modèle agro-environnemental EPIC (Environmental Policy Integrated Climate, anciennement

appelé Erosion-Productivity Impact Calculator); (2) les modèles agronomiques de la série CERES (Crop Environment REsearch Synthesis) utilisant le format IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer); et (3) le modèle économique CARE (Cost And Return Estimator). La méthode a aussi permis d'analyser les concepts d'itinéraire technique et de ferme. Cette analyse a résulté en la construction des modèles orientés-objets de chacun des modèles de simulation et du concept d'itinéraire technique. L'étude a permis d'identifié des lacunes actuelles des modèles de simulation pour répondre aux besoins futurs de simulation et pour éliminer des contraintes imposées actuellement par les modèles de simulation. Les concepts de temporalité et de localisation ont été introduits dans plusieurs classes d'objets pour décrire la nature évolutive (concept de temporalité) des fermes et permettre de particulariser une régie d'une région par rapport à une autre (concept de localisation). Plusieurs classes d'objets de ces modèles sont communes au niveau des entités mais non nécessairement au niveau des attributs.

L'intégration des modèles objets de chacun des modèles de simulation et du concept d'itinéraire technique a résulté en un modèle conceptuel objet unifié. Ce modèle est une représentation simplifiée de la réalité sous forme d'objets en fonction d'un but visé. L'exercice d'intégration ne modifie pas les algorithmes des modèles de simulation choisis. L'introduction des concepts théoriques d'itinéraire technique et de ferme ont facilité l'intégration et la réalisation du modèle conceptuel. Le modèle conceptuel objet unifié contient quarante-trois (43) classes d'objets et trois cent vingt-trois (323) attributs. Vingt-deux (22) classes sont communes à au moins deux modèles dont huit (8) classes sont communes aux trois modèles. Quatorze (14) classes sont propres à l'un ou l'autre des modèles. Neuf (9) nouvelles classes ont été introduites pour permettre l'intégration ainsi que la résolution de problèmes associés aux lacunes identifiées. La traduction du modèle conceptuel unifié en une base de données relationnelle supportée par le SGBD Oracle est présentée.

La faisabilité de l'intégration a priori des données sur le plan conceptuel en un modèle objet spatio-temporel unifié a été démontrée malgré la complexité du problème et le grand nombre de variables impliquées. La réalisation du modèle physique sur un SGBD relationnel Oracle permet de démontrer concrètement la faisabilité de cette approche. Sur le plan pratique, la BD permet le partage de l'information entre modèles, favorise la réutilisation des données pour d'autres simulations dans le même secteur et permet de dépasser plus facilement l'échelle locale.

WEED AND NITROGEN STRESS DETECTION IN CORN USING AIRBORNE HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING

P. K. Goel[1], S. O. Prasher[1], J. A. Landry[1], R. M. Patel[1], R. B. Bonnell[1], A. A. Viau[2], J. R. Miller[3]

[1] Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University,
21 111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9 <pgoel@po-box.mcgill.ca>
2 Département de géomatique, Université Laval, Ste-Foy, QC, G1K 7P4
3 Department of Physics and Astronomy, York University, 4700 Keele Street, Toronto, Ontario

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the efficiency of hyperspectral airborne remote sensing for the detection of weed infestation and nitrogen deficiency in corn (*Zea mays*) by conducting a field experiment at the McGill University Research Farm on Macdonald Campus, Ste-Anne-de-Bellevue, QC, Canada. The different weed treatments were as follows: no weed control, control of grasses, control of broadleaf, and full weed control. Various nitrogen levels were also used; i.e., 60, 120, and 200 kg N/ha. These applications subsequently created 12 different treatments, consisting of four weed and three nitrogen treatments. They were then arranged in a split plot design with weeds as main plot and nitrogen levels as subplot treatments. Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) was used to acquire hyperspectral data in the visible to near-infrared wavelength region (from 409 nm to 947 nm), three times during the growing season. Spectral responses among different weed control strategies were then observed. Nitrogen levels differed significantly ($P < 0.05$) in the various wavelength regions. Overall, spectrum regions in visible (from 528 nm to 573 nm) and in near infrared ranges (from 755 nm to 940 nm) were found to be most useful in detecting the diverseness among treatments. However, specific spectral regions to detect a particular treatment differed.

INTRODUCTION

Precision agriculture is a revolutionary concept of assessing and managing inherent spatial and temporal variability in a field. This type of farming could result in higher crop productivity and decrease environmental pollution. Mapping of crop growth affecting factors and variable rate technology (VRT) are the two most essential components of precision agriculture. VRT has the potential to vary fertilizer rates, pesticides applications, and tillage operations across the field (Tomer, et al., 1997). Currently effective mapping techniques are lacking (Sawyer, 1994). For the commercial extension of site-specific herbicide and fertilizer application technology, rapid and cost-effective methods for creating accurate weed maps (Lamb et al., 1999) and methods for soil nutrient deficiency detection (Ponzoni and Goncalves, 1999) are required. Traditional scouting or grid surveying methods for mapping site-specific information are very time-consuming and laborious. However, image-based remote sensing has potential applications in weed (Lamb et al., 1999; Moran et al., 1997) and nutrient stress detection (Ponzoni and Goncalves, 1999) for site-specific management of crops. Currently satellite spatial, spectral, and temporal resolutions are limiting factors for monitoring vegetation (Ponzoni and Goncalves, 1999). However, due to better resolution and flexibility in operation, airborne remote sensing is

becoming increasingly important for time-specific and time-critical precision crop management (Moran et al., 1997). Upcoming satellites would also be able to provide information at much higher resolution, which would open a new market for the agriculture sector (Brisco et al., 1998).

Change in the spectral response in the visible and infrared wavelength with plant growth has been well recognized. Leaves with higher nitrogen content have stronger spectral reflectance at blue and near infrared (NIR) wavebands. Spectral response of crop in different wavebands could be used to detect nitrogen deficiency in the crop (Blacker et al., 1995; Buschmann and Nagal, 1993). Aerial photographs, both color and color infrared, were used to predict nitrogen uptake and yield (Blackmer et al., 1995). Pillai et al. (1998) used high-resolution color infrared (IR) digital aerial imagery for detecting in-field spatial patterns, especially of nitrogen stress in corn. They also observed that canopy reflectance at different stages of crop growth was highly correlated to yield. Sui et al. (1998) reported a strong correlation between nitrogen status of cotton plants at various growth stages and spectral reflectance of their canopy. A number of successful studies have demonstrated the potential of remote sensing in the detection of weeds in rangelands (Everitt et al., 1995, 1996; Lass et al., 1996) and agricultural fields (Brown and Steckler, 1995; Hanson et al., 1995). Zwiggelaar (1998) mentioned that subtle differences between the spectral responses in different wavebands and different plants should be measurable to detect weeds.

In earlier studies either colored conventional photography, digital photography or videography were used. The key limitation that these studies encountered was their capability to arrive at quantitative decisions. These photographs were quite impressive for visual interpretation or qualitative assessment of field conditions. However, new multi and hyper-spectral imaging systems are capable of providing data in digital format at much higher spatial and spectral resolution in a cost-effective manner (Lamb, 1998). Digital format of data facilitates automated processing and drawing quantitative information. Moreover, hyperspectral sensors, due to their very high spatial resolution, are capable of capturing very subtle spectral differences among target categories. Studies using handheld spectroradiometers have demonstrated the potential of hyperspectral measurements in detection of weed and nitrogen levels in crops.

To the best of our knowledge, review of the past and ongoing research studies indicate that application of airborne hyperspectral imaging system used to monitor crop conditions is not fully explored and is still at infancy level. Thus, realizing the importance of remote sensing in precision agriculture, the objective of the study was to evaluate the potential of Compact Airborne Hyperspectral Spectrographic Imager (CASI) in weed detection under various weed control strategies and detection of nitrogen stress under different nitrogen application levels.

MATERIALS AND METHODS

Experimental design and layout

A field experiment in corn (*Zea mays*) was conducted in the summer 2000 at the Lods Seed Research Centre of Macdonald Campus, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, QC, CANADA. The experimental design was a factorial split-plot arrangement of treatments. The combination of four different weed control strategies and three different nitrogen levels were applied to form the experimental treatments. This resulted in 12 combinations of two factors, with weed as main and nitrogen as sub-plot treatments, and the four replicates of each treatment

were laid out in 48 plots. The weed treatments were; no weed control (W1), control of grasses (W2), control of broadleaf (W3), and full weed control (W4). Nitrogen fertilizer treatment consisted of low nitrogen (N 60 kg/ha, N0), normal nitrogen (120 kg/ha, N1), and high nitrogen (200 kg/ha, N2) plots. Plots were 20 m x 20 m size and consisted of 26 rows of corn. Corn was sown in the last week of May in 75 cm wide rows at the rate of 76000 seeds per ha. Different herbicides to impose weed treatments were applied in the last week of June. Imposition of fertilizer treatment was accomplished by broadcasting additional nitrogen fertilizer in the second week of July. Other recommended management practices were adopted and designed treatments were imposed on the plots.

Spectral measurements

Hyperspectral observations from a Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) in 72 narrow wavebands (408.73nm to 947.07 nm, in the visible and near-infrared region) were taken at three different critical growth stages of the crop. First observation was taken on 30th June in the early stage, the second was on 5th August at the tasseling stage, and the third was at the full growth stage on 25th August. The appropriate radiometric, geometric, and atmospheric correction were applied on the acquired hyperspectral data. Final corrected images were imported into ENVI software (ENVI 3.1, Research System, Inc., Boulder, Colorado, USA), and average reflectance values for each plot were extracted for all 48 plots.

Data analysis

The reflectance data extracted from the images were statistically analysed. The analysis of variance of the treatment effect on acquired spectral data was performed using the General Linear Model (GLM) procedure of SAS (SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) program. The analysis was done for 72 bands. Further, considering the space limitation results for the second flight (flight on 5th August) are only presented. At this time of the growing season, the impact of various weed and nitrogen treatments was more apparent on the growth of corn.

RESULTS AND DISCUSSION

Appropriate herbicide was applied to control grass in treatment (W2), and it was expected that broadleaf weeds would grow in the plots with this treatment. However, field observations revealed that broadleaf weeds were absent in these plots. This is not surprising due to spatial distribution of weeds in the field. Inclusion of these plots in the analysis could result in erroneous interpretation of the results. Therefore, this parameter was not considered, and the corresponding data was excluded from the analysis. Thus, only three weed treatments were considered.

The average reflectance values in various wavelength regions under different weed control strategies and nitrogen levels are shown in Figure 1. In the visible spectrum, reflectance peak reaches in the green wavelength region (centered around 550 nm), and then it reaches reflectance plateau in the near-infrared region after 762 nm. Another important observation, which could be made from the graph, is that under specific nitrogen level, the reflectance values under different weed treatments are quite distinct. Higher difference between the spectral values was observed in the visible region in the green wavelength region and in the near-infrared region. This indicates the possibility of detection of weeds under varying fertility levels across the field.

The analysis of variance and single-degree-of freedom contrast were carried out using the SAS GLM option with contrasts. Interaction between weed (as a main plot treatment) and nitrogen (as sub-plot treatment) was also considered during the analysis. Results of the analysis are summarized in Tables 1 and 2. Results indicate that nitrogen has significant effect ($P < 0.05$) on reflectance, and this was observed in almost all wavelength regions after 468 nm to 939 nm except in band 45 (waveband center 739 nm), and in 59, 60 and 61 bands (waveband centers 847, 854, and 862 nm, respectively). These wavelength regions include the important wavelength regions found by earlier researchers. Buschmann and Nagal (1993) reported that spectra in green (545 nm), red (660 nm), and NIR (800 nm) region could be related to plant nitrogen content. Blacker et al. (1995) observed that the reflectance of canopy, centered at 550 nm and acquired late in the growing season, could be used to detect nitrogen deficiency in the crop.

Significant difference in reflectance values among the different weed treatments was also observed ($P < 0.05$). However, as compared to the nitrogen treatments, differences in spectral response could be detected in lesser number of bands. Wavelength regions from 528 to 602 nm, 701 to 847 nm, and 870 to 939 nm were found to be more useful in the detection of different weed infestations. This concept is in accordance with the earlier studies of Brown et al. (1994). They analyzed the spectral reflectance characteristics of the canopies of seven weed species by using a field radiometer and found four spectral bands (centered at 440, 530, 650, and above 730 nm wavelengths) that were useful in discriminating among the different weed species. Overall, no interaction was found between weed and nitrogen treatments except in wavelength regions from 528 to 558 nm and in 717 to 739 nm range.

The results in Tables 1 and 2 provide evidence that there is a significant difference ($P < 0.05$) for various treatments found in different wavelength regions. Generally, wavelength region (528 nm to 580 nm) in the green region of visible spectrum and wavelength near and after 708 nm to the end of observed range i.e. 939 nm in the near-infrared region, are important to observe spectral differences due to weed presence and nitrogen content. It was also observed that no significant difference between W3 (broadleaf control) and W4 (full weed control) was observed in the visible region but in the near-infrared region the spectral response was significantly different ($P < 0.05$). In the case of nitrogen, the contrast analysis indicated that the difference between N0 (low nitrogen level, 60 kg N/ha) and the other two nitrogen treatments N1 (normal nitrogen, 120 kg N/ha) and N2 (high nitrogen, 200 kg N/ha) are significant in most of the wavelength regions. However, significant difference between N1 and N2 was observed in few wavelength regions. Overall, the contrast analysis indicates that differences among different weed and nitrogen treatments are significant ($P < 0.05$) in different wavelength regions. However, important wavelength regions vary for different treatments.

CONCLUSIONS

This field study demonstrated the potential of hyperspectral airborne remote sensing in the visible and near-infrared region to detect weed infestations and nitrogen stresses. Statistical analysis indicated that the spectral response of corn changes significantly due to either the presence of weeds and/or varying nitrogen fertilization levels. Generally, the green wavelength region of visible spectrum and the near-infrared region are important due to the fact that most of the differences could be detected in these regions, and possibly be used in discriminating stresses in cornfields. However, for different treatments most important wavelength regions were

different. Results of the analysis will be applicable in the development of weed infestation and nitrogen stress maps when applied on a field scale.

REFERENCES

Blackmer, T. M., J. S. Schepers, and G. E. Meyer. 1995. Remote sensing to detect nitrogen deficiency in corn. Proceeding of Site-Specific Management for Agricultural Systems. Second International Conference: ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI pp:505-512.

Brisco, B., R. J. Brown, T. Hirose, H. McNairn, and K. Staenz. 1998. Precision agriculture and the role of remote sensing: A Review. Canadian J. of Remote Sensing 24 (3): 315-327.

Brown, R. B. and J. P. G. A. Steckler. 1995. Prescription maps for spatially variable herbicide application in no-till corn. Transactions of the ASAE 38(3): 659-666.

Brown, R. B., J. P. G. A. Steckler, and W.G. Anderson. 1994. Remote sensing for identification of weeds in no-till corn. Transactions of the ASAE 37(1): 297-302.

Buschmann, C. and E. Nagel. 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. International Journal of Remote Sensing 14: 711-722.

Everitt, J. H., G. L. Anderson, D. E. Escobar, M. R. Davis, N. R. Spencer, and R. J. Andrascik. 1995. Use of remote sensing for detecting and mapping leafy spurge (*Euphorbia esula*). Weed technology 9: 599-609.

Everitt, J. H., D. E. Escobar, M. A. Alaniz, M. R. Davis, and J. V. Richerdson. 1996. Using spatial information technology to map Chinese Tamarisk (*Tamarix Chinesis*) infestations. Weed Science 44(1): 194-201.

Hanson, L. D., P. C. Robert, and M. Bauer. 1995. Mapping wild oat infestations using digital imagery for site-specific management for agricultural systems. ASA Misc. Publ., ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

Lamb, D. W. 1998. Opportunity for satellite and airborne remote sensing of weeds in Australian crops. In Precision Weed Management in crops and Pasture, eds R.W. Medd and J.E. Pratley. Proceedings of a workshop, 5-6 May, 154 pp. (CRC for Weed Management Systems, Adelaid).

Lamb, D. W., M. M. Weedon, and L. J. Rew. 1999. Evaluating the accuracy of mapping weeds in seeding crops using airborne digital imaging: *Avena spp.* in seeding triticale. Weed research 39: 481-492.

Lass, L. W., H. W. Carson, and R. H. Callihan. 1996. Detection of yellow *starthistle (Centaurea solstitialis)* and common St. Johnswort (*Hypericum perforatum*) with multispectral digital imagery. Weed Technology 10 (3): 466-474

Moran, M. S., Y. Inoue, and E. M. Barnes. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment 61: 319-246.

Pillai, S. G., L. Tian, and J. Beel. 1998. Detection of nitrogen stress in corn using digital aerial imagery. ASAE Annual International Meeting at Orlando. Paper no. 98-3030.

Ponzoni, F. J. and J. L. de M. Goncalves. 1999. Spectral feature associated with nitrogen, phosphorous, and potassium deficiencies in *Eucalyptus saligna* seedling leaves. International Journal of Remote Sensing 20(11): 2249-2264.

Sawyer, J. E. 1994. Concept of variable-rate technology with considerations for fertlizer technology. J. Production Agriculture 7: 195-201.

Sui, R., J. B. Wikerson, W. E. Hart, and D. D. Howard. 1998. Integration of neural networks with a spectral reflectance sensor to detect nitrogen deficiency in cotton. ASAE Annual International Meeting at Orlando. Paper no. 98-3104.

Tomar, M. D., J. L. Anderson, and J. A. Lamb. 1997. Assessing corn yield and nitrogen uptake variability with digitized aerial infrared photographs. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 63(3): 299-306.

Zwiggelaar, R. 1998. A review of spectral properties of plants and their potential use for crop/weed discrimination in row-crops. Crop Protection 17(3): 189-206.

Table 1. Results of the analysis of variance for main and subplot treatments, interaction and contrast for the spectral data (408 to 671 nm).

Waveband		Treatment		Interaction	Contrast					
No.	centre (nm)	Weed (W)	Nitrogen (N)	W*N	W1 vs W3	W1 vs W4	W3 vs W4	N0 vs N1	N0 vs N2	N1 vs N2
1	408.73	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2	416.13	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
3	423.53	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4	430.95	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
5	438.36	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6	445.79	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7	453.21	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
8	460.65	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
9	468.09	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
10	475.53	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
11	482.98	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*
12	490.44	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*
13	497.90	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
14	505.37	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
15	512.84	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
16	520.32	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
17	527.80	*	*	*	*	*	NS	*	*	*
18	535.29	*	*	*	*	*	NS	*	*	*
19	542.79	*	*	*	*	*	NS	*	*	*
20	550.29	*	*	*	*	*	NS	*	*	*
21	557.79	*	*	*	*	*	NS	*	*	*
22	565.30	*	*	NS	*	*	NS	*	*	*
23	572.82	*	*	NS	*	*	NS	*	*	*
24	580.34	*	*	NS	*	*	NS	*	*	NS
25	587.86	*	*	NS	*	*	NS	*	*	NS
26	595.39	*	*	NS	*	*	NS	*	*	NS
27	602.93	*	*	NS	*	*	NS	*	*	NS
28	610.47	NS	*	NS	*	*	NS	*	*	NS
29	618.02	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
30	625.57	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
31	633.13	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
32	640.69	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
33	648.26	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
34	655.83	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
35	663.41	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
36	670.99	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS

* Significant at < 0.05 probability level
NS Non significant at < 0.05 probability level

Table 2. Results of the analysis of variance for main and subplot treatments, interaction and contrast for the spectral data (678 to 947nm).

Waveband		Treatment		Interaction	Contrast					
No.	centre (nm)	Weed (W)	Nitrogen (N)	W*N	W1 vs W3	W1 vs W4	W3 vs W4	N0 vs N1	N0 vs N2	N1 vs N2
37	678.57	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
38	686.17	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
39	693.76	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
40	701.36	*	*	NS	*	*	NS	*	*	NS
41	708.97	*	*	NS	*	*	NS	*	*	*
42	716.58	*	*	*	*	*	NS	*	*	*
43	724.20	*	*	*	*	*	*	*	*	*
44	731.82	*	*	*	*	*	*	NS	*	*
45	739.45	*	NS	*	*	*	*	NS	NS	NS
46	747.08	*	*	NS	*	*	*	*	*	NS
47	754.71	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
48	762.35	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
49	770.00	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
50	777.65	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
51	785.30	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
52	792.96	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
53	800.62	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
54	808.29	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
55	815.96	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
56	823.64	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
57	831.32	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
58	839.01	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
59	846.70	*	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS
60	854.39	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
61	862.09	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
62	869.80	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
63	877.51	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
64	885.22	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
65	892.93	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
66	900.66	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
67	908.38	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
68	916.11	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
69	923.84	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
70	931.58	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
71	939.33	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
72	947.07	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* Significant at < 0.05 probability level
NS Non significant at < 0.05 probability level

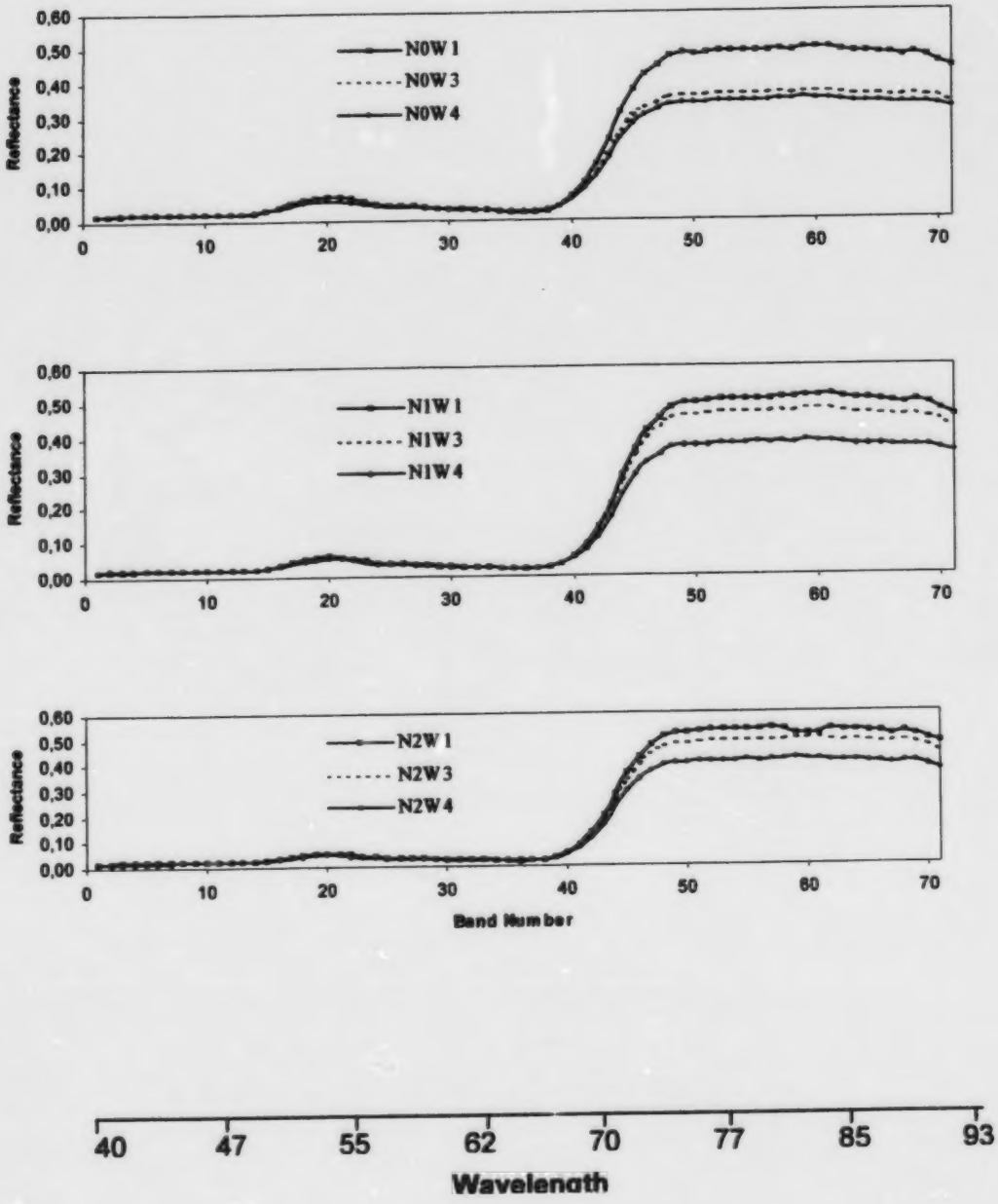


Figure 1. Spectral response curves of corn under different nitrogen levels and weed control conditions during the second flight (August 5, 2000).

APPLICATION OF DATA MINING FOR IMAGE CLASSIFICATION IN REMOTE SENSING

Chun-Chieh Yang, Shiv O. Prasher, Pradeep K. Goel & Ramanbhai Patel

Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Macdonald Campus of McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9 <chun-chieh.yang@mcgill.ca>

ABSTRACT

The purpose of this study was to use a data mining technique, decision-trees, to classify multi-spectral images of experimental plots having different crop and weed populations. Eleven types of plot were prepared for this study. Eight types were seeded with corn or soybean and were either: 1) weed-free; 2) co-populated by velvet leaf only; 3) co-populated with a mixture of grass species; or 4), co-populated with the predominant weed species of the regions. The other three types were as 2), 3) and 4), with neither corn nor soybean. An aircraft-mounted pushbroom imaging spectrometer was used to obtain scans of the plots in one blue, five green, five red and thirteen infrared bands. Eight classification problems involving different degrees of recognition complexity were set up. Each was tested using three different input types from the multi-spectral data. The three types of input were: a) absolute values of radiance from the 24 wave bands, b) the vegetation index (VI) which consists of 12 inputs, and c) the normalized difference vegetation index (NDVI) which consists of 65 inputs. Results showed that the most complex classification problem (distinguishing between 11 crop/weed combinations) was best resolved using the NDVI inputs (success classification of 0.85 as compared to 0.79 and 0.55 for the absolute radiance and VI's respectively). Moreover, NDVI's performed best as inputs in seven out of the eight problems.

INTRODUCTION

Machine vision and machine learning technologies are essential to the further development of precision agriculture. Weed control is one of the many operations that could be performed according to precision farming methods, given adequate imaging, image processing, and machine learning technologies (Felton and McCloy, 1992; Zanin et al., 1998). Whether weeding is to be done by chemical or mechanical means, it is necessary to obtain images containing information that can be interpreted to indicate presence and absence of weeds in a cropped field, and quantify and/or qualify the necessity of treatment at a given location, prior to issuing control instructions to the weeding device.

Color imagery in the visible part of the spectrum alone has been found to lack sufficient information for reliable differentiation of plant species by machine learning technologies such as artificial neural networks (Yang et al., 2000). Sufficient ambiguity caused by similarity of shape and color of different plant types limited the ANN performance during that research. Multi-spectral scans (MSS) involving near-infrared as well as visible light wave bands are generally accepted to be the imaging technique of choice to differentiate between plant species and background objects (Anonymous, 1997; McGowen, 1998). Near-infrared and the ratios of responses in various visible and near-infrared bands can provide information as to temperature, moisture, and various physiological

and biochemical characteristics of the objects (Lamb et al., 1999; Taylor et al., 1998). This provides additional dimensions to the discriminatory potential of the images.

Object recognition and differentiation can be built into the overall precision spraying system using machine learning algorithms such as artificial neural networks (ANNs) and decision trees (DTs) if adequate information is provided by the machine vision system. ANN development dates back to the 1940's, as part of research on artificial intelligence, whereas DTs were developed in the 1960's (Flamig, 2000; Witten and Frank, 2000). Both algorithms are now considered to be part of the knowledge discovery in databases (KDD) strand of data mining (DM), a field which also encompasses statistics, commercial support systems, data warehousing, and on-line analytical processing (Flamig, 2000). The term "data mining" has only been in existence for a few years, although most of the statistics and machine learning algorithms now associated with DM were developed much earlier.

Although ANN's are designed to predict numeric outputs from inputs, the outputs can be submitted to thresholds that define category boundaries. DTs are more directly suited to classification since data representing a given individual are sorted through the decision tree structure to fall directly into a pre-defined category in an approach analogous to a botanical key. The main difference between ANNs and DTs is that the ANNs are more of a "black box", relying on iterative training to adjust parameters of many (and cross-connected) transfer functions to improve their predictive ability relative to training data for which the outputs are known. It is extremely difficult to retrieve explanations for phenomena when ANNs are used (Witten and Frank, 2000). DTs, on the other hand, use dichotomization to route incoming data to the correct category, as is done in botanical keys. Even if the differentiation criteria at each level of the DT structure are generated by the software, it is possible to investigate the criteria in an effort to understand on what basis differentiation has been made (Witten and Frank, 2000).

The objectives of the present study were to determine to what degree of resolution an automated decision tree algorithm could accurately classify MSS images of experimental plots containing crop and/or weeds, as well as to determine which representation of the data would result in the best performance. The results were analyzed to evaluate the potential of data mining in agricultural remote sensing.

METHODS AND MATERIALS

Data collection

The experimental plots used in this study were set up in a field at the Macdonald Campus Experimental Farm of McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada, in the summer of 1999. There were 33 plots, each measuring 3 m x 3 m. Three replicates of each of 11 plot types were randomized to the 33 plots. The target crops were corn (*Zea mays*, L) and soybean (*Glycine max*) and were sown in the second week of May, 1999. For each crop, one set of replicates was maintained in weed-free condition. In the second set of replicates, only velvetleaf (*Abutilon theophrasti* Medic) was permitted to proliferate. In the third set of replicates, only mixed grasses were allowed to proliferate, whereas all predominant weed species were allowed to proliferate in the fourth set of cropped

replicates. Three other sets of replicates were also established, one for each type of weed population permitted in the 24 cropped plots. All weeding was done by hand. The 11 plot types are described in Table 1. Plots were fertilized according to standard practice for this region.

Multi-spectral scans of the plots were obtained on July 12, 1999 by Agrimage Inc., Sherbrooke, Quebec. The scanner was an AISA pushbroom imaging spectrometer which was mounted on a Piper Seneca airplane. The digital images collected have a resolution of 1 m x 1 m. Each pixel of the images contains radiometrically-corrected radiance for 24 wave bands in the blue to near-infrared range as specified in Table 2. The data were geo-corrected and geo-referenced on a PC. In each plot of 9 m^2, the average radiance values for each of the 24 wave bands were determined from the central portion of this plot. A total of 792 (33 plots x 24 wave bands) multi-spectral data were collected and used for the further analysis and modeling.

Data preparation

Three different input formats were created. The first format consisted of the absolute values of 24 wave bands in each plot. The second format was the vegetation index, VI(a,b). It is the ratio of the value for the red wave band (a) to that of the near infrared wave band (b). This index can indicate the contrast between plants and soil and other background because, for the plants, the difference between the near infrared radiance or reflectance and the visible one is generally more evident (Anonymous, 1997; Zwiggelaar, 1998). For this study, 12 VIs were calculated for each plot using red wave bands, 8 and 9, and near-infrared wave bands, 16 to 21 (Table 2) and were used as inputs for the DT models. The third format consisted of the normalized difference vegetation indices, NDVI(a,b). An NDVI is defined as the ratio of the difference between the red and near-infrared radiance to the total for the two bands. Several experiments have shown that this index can indicate the condition of vegetation under various illuminations, aspects, and against non-vegetated ground surface (Anonymous, 1997). Since data were available for 5 red bands and 13 near-infrared bands, a total of 65 NDVIs were computed and used as inputs to the DT models.

Decision tree methodology

The machine-learning software used to generate decision trees was AnswerTree version 2.1 (SPSS Inc., Chicago, IL). This data mining software package was run on a PC with Pentium II-300 microprocessor, 4 GB hard disk space and 128 MB of RAM. The operating system was Windows 98. AnswerTree offers four analytical algorithms (SPSS, 1998): 1) the chi-squared automatic interaction detector (CHAID); 2) the exhaustive CHAID; 3) the classification and regression tree (C&RT); and, 4) the quick, unbiased, efficient statistical trees (QUEST). From the results of the preliminary investigations, C&RT was found to be the most proper method for the classification of MSS data in this study.

C&RT analysis is a dichotomizing and recursive algorithm (Breiman et al., 1984). The input data set is partitioned into specifically two subsets on the basis of the predictor variable that minimizes the variance in the response variable in the least-squares sense. At this level, it is analogous to the best regression technique in that the most important predictor variable is detected. In this study, the predictor variables were one of three types, the absolute values of the 24 MSS bands, the 12 VIs obtained from the original data, or the 65 NDVIs obtained from the original data. The response variable was categorized as the type of experimental plot. Each of the subsets is then partitioned

again on the basis of the predictor variable (not necessarily the same one for the two subsets) that again minimizes the variance(s) in the response(s).

Before the recursive partitioning can be done, it is necessary to choose a method for determining the best split at each node, a basis for deciding whether to continue splitting or stop splitting a node, and a method for assigning probabilities to terminal nodes (a terminal node being one which is not split later). For a stopping rule, a certain tree level boundary is reached so that it is not necessary to split nodes in another tree level further, or the number of data in a node is not larger than a certain limit so that it is not necessary to further divide the data into other subgroups.

Model development and evaluation

Eight DT models were generated using each of three input data types. The eight DT models represented a different classification problem, as described in Table 3. Several preliminary trial-and-error runs indicated that the tree structures would not involve more than five levels. Thus, the maximum tree level was set at five for the boundary. The minimum data number was set at five for the mother nodes and two for the child nodes. The decision trees were cross-validated (SPSS, 1998; Weiss and Kulikowski, 1991) with the number of sample folds set at ten, as recommended by Weiss and Kulikowski (1991). In the beginning of the development for each model, the training data was randomly split into ten subgroups, and the random seed was always set at the default number of 2,000,000. A decision tree was then generated with nine of ten subgroups and validated by the remaining subgroup. The validated subgroup would be different at each validation phase and this process would be repeated for ten times. Finally, the success classification rate at each validation phase was determined and the average success recognition and standard error of the 10 validation runs for each model was reported in Table 4.

RESULTS AND DISCUSSIONS

A comparison of success recognition rates for the eight DT models, according to input type is given in Table 4. The most complex differentiation problem, by the Model (3), was best resolved with the NDVI as inputs (average success recognition rate = 0.85±0.06), followed by the absolute values of the 24 bands (0.79±0.07) and the VIs (0.55±0.09). The models performed best with NDVIs as input, except in the case of Model (1) and in cases where NDVI and at least one other input type yielded perfect recognition (recognition success = 1.0, standard error = 0). These results are not entirely surprising because the NDVI format used more information from the original data than either of the other formats (recall that there were 65 NDVIs for each data set, whereas there were only 12 VIs and 24 absolute values). One may deduce from Table 4 that the average success recognition rate for a given row (i.e. for an input data type) is related to the number of inputs involved, such that the second-best performance can be associated with the absolute value format, and the poorest with the VIs as input.

Perfect recognition was obtained by Models (4), (5), (6) and (8) when NDVIs were used as inputs. For Model (4), differentiating between plots with weed-free corn and those with both corn and weeds, all input types yielded decision trees with perfect results. The perfect results for Model (5) using NDVI were particularly encouraging because the type of weed population in a cornfield could

also be recognized. It is not surprising that the success recognition for Model (8) was also perfect since the recognition problem only involved distinguishing between the three types of weed population, i.e., a subset of the Model (5) problem. When comparing results for Models (6), (7) and (8), there appears to be some ambiguity caused by the fact of having soybeans and weeds in the same plots, regardless of type of input data used.

The results show that, for Model (1), one of twelve plots with corn and another one of twelve plots with soybean were misclassified as weeds but no crop, as well as two of nine plots with weeds but no crop were classified as fields with soybean. For Model (2), one of the three weed-free soybean plots were classified as plots with weeds and no soybeans, whereas the other two of these three plots were misclassified as corn/weed plots. By Model (3), one of the soybean/velvetleaf plots and one of the soybean/predominant weed plots were misclassified as being soybean with a mixture of grasses, whereas one of three plots with a mixture of grasses was misclassified as one having a mixture of predominant weeds as well as the other two of these three plots were misclassified as being corn with a mixture of grasses. By Model (7), one of the soybean/velvetleaf plots was misclassified as soybean/predominant weeds, and one soybean/predominant weed plot was misclassified as soybean/mixed grasses.

Although the numbers of inputs available for the decision tree development are quite varied among different input types (24 wave bands, 12 VIs, and 65 NDVIs), for the same model, the number of inputs selected by the decision tree development is almost the same among different input types. It is not clear at this point whether the misclassification is due to limitations of the decision tree algorithm in quantifying or qualifying various parts of the image with respect to plant species and density, which could be the result of sufficient overlap of species distributions in the various plots. The original images will have to be studied in detail to determine whether, for example, velvetleaf may have been the predominant weed in some of the plots containing a mixture of predominant weeds, or whether there is sufficient similarity between the spectral responses of velvetleaf and one of the mixed grasses to create ambiguity in the data.

CONCLUSIONS

A data mining technique, decision tree analysis, was used to classify multi-spectral data sets from 33 experimental plots containing various combinations of crop (corn or soybean) and weed species. The results indicate that a reasonable degree of differentiation may be obtained for the most complex of the recognition problems investigated, which was to classify the 33 plots into 11 plot categories. The success recognition rate for this task was highest when 65 NDVIs were used as predictors in the decision tree (0.85±0.06). The NDVIs yielded the best overall recognition success, compared to the absolute values from 24 wave bands or the 12 VIs used as inputs. Since the number of inputs selected for the decision tree development is almost the same among different input types, overall recognition success may be mainly related to the input type, and may or may not be related to the number of inputs. Regardless of input type, misclassifications appeared to be related to ambiguity in the data relative to soybean and velvetleaf and possibly one of the other weed species involved. A detailed investigation of the original images is underway. In this study, data mining has shown its potential to be applied to classification of remote sensing data in agricultural fields.

REFERENCES

Anonymous. 1997. *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, DC: National Research Council, National Academy Press.

Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. J. Stone. 1984. *Classification and Regression Trees*. Belmont, CA: Wadsworth.

Felton, W.L. and K. R. McCloy. 1992. Spot spraying: microprocessor-controlled, weed-detecting technology helps save money and the environment. *Agricultural Engineering* 73(6): 9-12.

Flamig, B. 2000. Discover the value of data mining: turning piles of stagnant information into golden opportunities. *How Computers Work, Part II* 4(3): 120-125.

Lamb, D. W., M. M. Weedon and L. J. Rew. 1999. Evaluating the accuracy of mapping weeds in seedling crops using airborne digital imaging: Avena spp. In seedling triticale. *Weed Research* 39(6): 481-492.

McGowen, I. J. 1998. Remote sensing: background to the technology and opportunities for mapping pasture weeds. In: *Precision Weed Management in Crops and Pastures*, edd. R. W. Medd and J. E. Pratley, University of Adelaide, Australia.

SPSS. 1998. *AnswerTree 2.0 User's Guide*. Chicago, IL: SPSS Inc.

Taylor, S. L., W. R. Raun, J. B. Solie, G. V. Johnson, M. L. Stone and R. W. Whitney. 1998. Use of spectral radiance for correcting nitrogen deficiencies and estimating soil test variability in an established bermudagrass pasture. *Journal of Plant Nutrition* 21(11): 2287-2302.

Weiss, S. M., and C. A. Kulikowski. 1991. *Computer Systems That Learn*. San Mateo, CA: Kaufmann Publishers.

Witten, I. H. and E. Frank. 2000. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with JAVA Implementations*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.

Yang, C.-C., S. O. Prasher, J.-A. Landry, H. S. Ramaswamy and A. DiTommaso. 2000. Application of artificial neural networks in image recognition and classification of crop and weeds. *Canadian Agricultural Engineering* 42(3): 147-152.

Zanin, G., A. Berti and L. Riello. 1998. Incorporation of weed spatial variability into the weed control decision-making process. *Weed Research* 38(2): 107-118.

Zwiggelaar, R. 1998. A review of spectral properties of plants and their potential use for crop/weed discrimination in row-crops. *Crop Protection* 17(3): 189-206.

Table 1. Treatments used in the study.

Plot code	Planted crop	Existence of weeds
1	Corn	None
2	Corn	Velvetleaf
3	Corn	Mixture of various grass species
4	Corn	Mixture of random predominant weed species
5	Soybean	None
6	Soybean	Velvetleaf
7	Soybean	Mixture of various grass species
8	Soybean	Mixture of random predominant weed species
9	None	Velvetleaf
10	None	Mixture of various grass species
11	None	Mixture of random predominant weed species

Table 2. Details of the multi-spectral data collected in May, 1999 in each wave band.

Band code	Band interval (nm)	Band center (nm)	Band width (nm)	Spectral region
1	475.12-479.86	477.49	4.74	Blue
2	500.40-508.30	504.35	7.90	Green
3	541.48-549.38	545.43	7.90	Green
4	552.40-560.75	556.58	8.35	Green
5	572.44-580.79	576.62	8.35	Green
6	587.47-595.82	591.65	8.35	Green
7	632.56-639.24	635.90	6.68	Red
8	672.64-679.32	675.98	6.68	Red
9	682.66-687.67	685.17	5.01	Red
10	687.67-692.68	690.18	5.01	Red
11	697.69-702.70	700.20	5.01	Red
12	702.70-707.71	705.21	5.01	Near infrared
13	714.52-719.71	717.12	5.19	Near infrared
14	724.90-730.09	727.50	5.19	Near infrared
15	733.55-738.74	736.15	5.19	Near infrared
16	743.93-749.12	746.53	5.19	Near infrared
17	754.31-759.50	756.91	5.19	Near infrared
18	775.07-778.53	776.80	3.46	Near infrared
19	794.10-797.56	795.83	3.46	Near infrared
20	809.67-813.13	811.40	3.46	Near infrared
21	826.97-830.43	828.70	3.46	Near infrared
22	854.65-859.84	857.25	5.19	Near infrared
23	878.87-884.06	881.47	5.19	Near infrared
24	904.82-910.01	907.42	5.19	Near infrared

Table 3. Classified categories of the outputs for each plot condition by the eight models.

	Classified category for each plot							
	(1) [1]	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1 [2]	corn	corn	corn	corn	corn	- [3]	-	-
2	corn	corn+ weeds	corn+ velvetleaf	corn+ weeds	corn+ velvetleaf	-	-	-
3	corn	corn+ weeds	corn+ mixed grass	corn+ weeds	corn+ mixed grass	-	-	-
4	corn	corn+ weeds	corn+ mixed weeds	corn+ weeds	corn+ mixed weeds	-	-	-
5	soybean	soybean	soybean	-	-	soybean	soybean	-
6	soybean	soybean +weeds	soybean+ velvetleaf	-	-	soybean +weeds	soybean+ velvetleaf	-
7	soybean	soybean +weeds	soybean+ mixed grass	-	-	soybean +weeds	soybean+ mixed grass	-
8	soybean	soybean +weeds	soybean+ mixed weeds	-	-	soybean +weeds	soybean+ mixed weeds	-
9	weeds	weeds	velvetleaf	-	-	-	-	velvetleaf
10	weeds	weeds	mixed grass	-	-	-	-	mixed grass
11	weeds	weeds	mixed weeds	-	-	-	-	mixed weeds

(1) [1]: Model code
1 [2]: Plot code referred to table 1
- [3]: Not considered by the model

Table 4. Results of success classification rates and standard errors for decision-tree models

Input format		Models							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
A [1]	C. R. [4]	0.97	0.91	0.79	1	0.92	0.92	0.75	1
	S. E. [5]	0.03	0.05	0.07	0	0.08	0.08	0.13	0
B [2]	C. R.	0.82	0.7	0.55	1	0.92	1	0.67	0.78
	S. E.	0.07	0.08	0.09	0	0.08	0	0.14	0.14
C [3]	C. R.	0.88	0.91	0.85	1	1	1	0.83	1
	S. E.	0.06	0.05	0.06	0	0	0	0.11	0

A [1]: radiance as inputs
B [2]: VI as inputs
C [3]: NDVI as inputs
C. R. [4]: classification rate
S. E. [5]: standard error

MODÈLE D'INFILTRATION D'AIR DANS LES SILOS HORIZONTAUX EN FONCTION DE LA COUVERTURE

Vladimir Kuzin[1] et Philippe Savoie[2]

[1]Département des sols et de génie agroalimentaire,
Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4
[2]Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures,
Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ste-Foy, Québec, G1V 2J3 <psavoie@grr.ulaval.ca>

RÉSUMÉ :

Les modèles d'infiltration d'air dans les silos horizontaux développés jusqu'ici supposaient que la concentration d'oxygène $U(x)$ variait seulement selon la profondeur. La variation dans le temps était considérée négligeable, c'est-à-dire que l'atteinte d'un équilibre entre l'entrée d'oxygène, la respiration et la sortie d'oxygène dans chaque élément du silo était très rapide. ($\partial U/\partial t = 0$). Pour améliorer la prédiction de l'infiltration d'air dans les silos horizontaux, un nouveau modèle est proposé pour tenir compte de la variation de la concentration d'oxygène dans le temps. À l'aide d'une solution numérique, on a estimé des pertes de matière sèche oxydable (MSO) de 21%, 13% et 6% dans les couches supérieures de 0 à 50 mm, de 50 à 100 mm, et de 100 à 200 mm, respectivement, après dix jours d'infiltration d'air dans un silo sans couverture. Après 300 jours, on a estimé des pertes globales de 10% de la MSO dans un silo de 3 m de profondeur sans couverture. Avec une couverture d'un film de polyéthylène d'épaisseur de 0,1 mm, les pertes globales de MSO étaient inférieures à 2%, selon le modèle après 300 j d'entreposage. Quand on considère le coût du polyéthylène et la valeur des pertes, il est plus économique de ne pas couvrir si la durée d'entreposage est inférieure à 40 j. Un film de 0,1 mm d'épaisseur offre la solution la plus économique pour un entreposage de 125 j. Un film de 0,2 mm est optimal pour un entreposage de 300 j. Le modèle pourrait servir à évaluer la valeur de couvertures organiques ou de biofilms comme substituts aux films de polyéthylène.

INTRODUCTION

Les éleveurs peuvent conserver l'ensilage de différentes façons, notamment en silos-tour, en silos horizontaux-couloir, en silos-boudin et en grosses balles humides enrubannées (Savoie et Jofriet, 1998). Pour les gros élevages, on perçoit une nette tendance pour le silo horizontal-couloir en raison des coûts de construction relativement faibles, d'une plus grande sécurité d'opération qu'avec les silos-tour (pas de gaz toxiques dans des aires fermées, peu de risque de chute) et d'une grande rapidité des chantiers tant au remplissage qu'à la vidange (Bodman et Holmes, 1997). Même pour les petits et moyens élevages, on observe un intérêt croissant pour le silo horizontal-couloir (Jakob et Van Caenegem, 1994; Pelletier et al., 2000).

Le silo horizontal-couloir produit moins de déchets plastiques que les autres systèmes qui utilisent le film de polyéthylène pour assurer l'étanchéité durant la conservation. On estime la quantité de déchets plastiques à 0,3 kg/t de matière sèche (MS) pour le silo horizontal-couloir, à

2,1 kg/t MS pour les balles rondes enrubannées et à 2,0 kg/t MS pour les silos-boudin (Savoie et al., 2000). Dans le but d'éliminer complètement les déchets plastiques, certains producteurs ne couvrent tout simplement pas leur silo horizontal (Bolsen, 1997). Cependant, la valeur des pertes dues à l'oxydation est généralement beaucoup plus élevée que le coût des films plastiques (Holmes, 1998). Certains chercheurs ont proposé des biofilms à base d'amidon, de protéines ou d'huiles végétales qui protégeraient la surface externe de l'ensilage tout en étant comestibles (Brusewitz et al., 1991). Toutefois les biofilms développés jusqu'ici n'ont pas démontré de bonnes propriétés imperméabilisantes, et ils ne sont guère utilisés en pratique.

L'analyse théorique de l'infiltration d'air dans les silos horizontaux présente donc un intérêt à plusieurs niveaux. D'abord, elle permet de comprendre le processus de diffusion des gaz dans l'ensilage et d'estimer les pertes en fonction du temps. Ensuite, elle permet d'optimiser la couverture, notamment l'épaisseur du film de polyéthylène en fonction de la durée d'entreposage et d'autres facteurs comme la hauteur du silo, le type de fourrage et sa masse volumique. Enfin, un modèle d'infiltration d'air en silo horizontal pourrait servir à évaluer des couvertures alternatives pour remplacer le polyéthylène comme la paille ou d'autres produits organiques.

Le modèle développé dans cette étude est basé initialement sur le modèle de Pitt (1986) qui a suggéré un modèle en régime permanent où la concentration d'oxygène dépendait seulement de la position dans le silo, et non pas du temps. Il a justifié cette hypothèse du fait que la concentration d'oxygène, initialement égale à celle de l'air partout dans le silo, soit 0,21 m^3 O_2 / m^3 de gaz, s'abaisse rapidement à une concentration d'équilibre où l'entrée d'oxygène dans chaque élément est égale à la sortie plus l'oxygène utilisé pour la respiration. Le même modèle a été utilisé pour les silos-meule par Savoie (1988) et par Buckmaster et al. (1989) qui ont estimé l'ensemble des pertes reliées à la conservation en ensilage. On constate que les modèles antérieurs n'ont pas tenu compte de la variation de la concentration d'oxygène dans le temps. De plus, on sait que le taux de respiration dépend non seulement de la concentration d'oxygène mais aussi de la concentration du substrat, c'est-à-dire la matière sèche de l'ensilage, en particulier la partie oxydable (sucres et autres hydrates de carbone assimilables). Le taux de respiration est aussi influencé par la température ambiante, elle-même influencée par le dégagement de chaleur lors de la respiration.

Le but de cette étude était donc de développer un modèle d'infiltration d'air dans les silos horizontaux qui tienne compte aussi de la variation d'oxygène dans le temps. On a utilisé ce nouveau modèle pour optimiser le choix de l'épaisseur d'un film de polyéthylène et pour évaluer l'impact de différents niveaux de perméabilité de la couverture sur les pertes d'ensilage.

MODÈLE THÉORIQUE

Pour comprendre le modèle, on se réfère à la figure 1 qui représente schématiquement un silo horizontal et les coordonnées d'analyse de la diffusion de l'oxygène. On suppose que l'oxygène diffuse seulement verticalement de la surface extérieure (à $x = 0$, $U_0 = 0{,}21$ m^3 O_2 / m^3 d'air) jusqu'au fond imperméable (à $x = L$, $\partial U / \partial x = 0$). Le modèle tient compte seulement de la matière sèche oxydable (MSO), qui représente environ 80% de la MS. La différence entre MS et MSO, c'est-à-dire la matière sèche non-oxydable, n'est pas comptabilisée dans le modèle

d'oxydation et de pertes; cette différence (environ 20% de la MS) représente les cendres et la lignine. Le modèle est représenté par un système de deux équations comme suit:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S_{mso}}{\partial t} = -k_1 U S_{mso} \\ \dfrac{\partial U}{\partial t} = D\dfrac{\partial^2 U}{\partial x^2} - k_2 U S_{mso} \end{cases} \qquad (1)$$

où $S_{mso}(x, t)$ est la masse volumique de la MSO (kg / m^3), $U(x, t)$ est la concentration d'oxygène (m^3 O_2 / m^3 d'air), t est le temps, x est la position dans le silo, $D(\Theta,l)$ est le coefficient de diffusion de l'oxygène (m^2 / h) qui dépend de la porosité Θ et de la longueur l des brins de l'ensilage, $k_1 = 0{,}9375 S_{oxy}(T) R_a / U_0$, $k_2 = R_a/(U_0\,\Theta)$, la valeur 0,9375 est un ratio entre la MSO et la masse d'oxygène selon l'équation de respiration cellulaire (ci-après), $S_{oxy}(T)$ est la masse volumique d'oxygène, T est la température du fourrage, R_a est la vitesse spécifique de respiration du fourrage dans l'air (m^3 O_2 / kg-h) qui dépend de T, de d_m la teneur de matière sèche (kg de MS / kg de masse humide) et du pH. Les ratios proviennent de l'équation de respiration des hydrates de carbone qui sont assimilés à la MSO (Wood et Parker, 1971).

$$180\text{g } C_6H_{12}O_6 + 192\text{g } O_2 \rightarrow 264\text{g } CO_2 + 108\text{g } H_2O + 2830\text{ kJ} \qquad (2)$$

Les conditions initiales pour le système d'équations (1) sont:

$$S_{mso}(x,0)=S_0\,,\quad U(x,0)=U_0\,. \qquad (3)$$

Les conditions limites pour la deuxième équation du système (1) sont:

$$D\frac{\partial U}{\partial x}(0,t) = H[U(0,t)-U_0], \qquad \frac{\partial U}{\partial x}(L,t) = 0\,. \qquad (4)$$

La variable H est la perméabilité de la couverture (cm^2 / atm-h).
Si les fonctions $R_a(T, d_m, pH)$ et $D(\Theta,l)$ sont connues, nous pouvons résoudre le problème (1,3,4) en utilisant des méthodes numériques.

RÉSOLUTION NUMÉRIQUE

Supposons que la température, pH et d_m sont constants. Le coefficient de diffusion a été calculé par la formule de Rees et al. (1983)

$$\ln D = 5{,}14\,\Theta - 0{,}017\,l - 6{,}69 \qquad 8<l<30\text{mm}$$

Le système d'équations a été résolu en utilisant la méthode de Galerkin (Strang et Fix, 1973). On a partagé l'intervalle de temps $(0, t_{max})$ en m parties et l'intervalle $(0,L)$ en n parties. Les solutions sont de la forme suivante:

$$S_{mso} = \sum_{i=1}^{n} a_i(t)\Psi_i(x), \qquad U = \sum_{i=1}^{n} b_i(t)\Psi_i(x) \tag{7}$$

où $\Psi_i(x)$ représente les fonctions de base (les triangles). On a utilisé le schéma Crank-Nicholson pour convertir les équations différentielles partielles en deux systèmes d'équations différentielles ordinaires avec $2n$ inconnues $a_1(t)$, ..., $a_n(t)$, $b_1(t)$, ..., $b_n(t)$.

Pour la simulation, on a utilisé les paramètres suivants: la profondeur du silo L = 3 m (0 < x < 300 cm); la période de la conservation t_{max} = 300 jours (0 < t < 7200 h); la masse volumique de matière sèche oxydable $S_{mso}(x,0)$ = 0,15 g/cm^3; la masse volumique de l'ensilage S_{mh}=0,6 g/cm^3; la concentration initiale d'oxygène dans le gaz du silo U_0=0,21 cm^3 O_2/cm^3 de gaz; le coefficient de diffusion D = 44 cm^2/h; la porosité du fourrage = 0,45; la longueur de coupe l = 1 cm; la perméabilité de la couverture H = 0,00486 cm^{2}atm^{-1}h^{-1}; la vitesse spécifique de respiration du silo k_2 = 5,33 cm^3 O_2 g^{-1} h^{-1}; la masse volumique de l'oxygène S_{oxy}(20 ^{0}C) = 0,00133 g/cm^3.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Sur la figure 2, on présente le changement de la MSO dans les couches du haut (entre 0 et 20 cm) d'un silo sans couverture, entre 0 et 3000 h. On observe en particulier dans la couche de surface (0 à 5 cm) que la concentration de MSO passe de 0,15 à environ 0,12 g/cm^3 en dix jours, soit une perte de 21%. Dans la couche comprise entre 5 et 10 cm, la concentration de MSO après dix jours est d'environ 0,13 g/cm^3, soit une perte de 13%. Dans la couche comprise entre 10 et 20 cm, la concentration de MSO après dix jours est d'environ 0,14 g/cm^3, soit une perte de 6%. Après 125 jours (3000 h), la perte est encore plus considérable.

À la figure 3, on présente le changement de la concentration d'oxygène dans diverses couches durant la première journée (0 à 24 h). En surface (sans couverture), on observe que la concentration d'oxygène demeure élevée et qu'à la longue toute la MSO sera oxydée. À seulement 20 cm de la surface, la concentration descend rapidement sous le seuil de 0,05 qui est considéré comme le seuil sous lequel les micro-organismes de respiration deviennent inactifs (Rees et al., 1983).

À la figure 4, on observe les pertes totales de MSO dans un silo de 3 m de profondeur avec des couvertures de polyéthylène de diverses épaisseurs. Les épaisseurs couramment utilisées, entre 0,01 et 0,02 cm, occasionnent des pertes inférieures à 2% de la MSO après 7 000 h (environ 300 j). Un film théorique de 0,0001 cm d'épaisseur ne peut être assimilé à pratiquement aucune couverture. C'est dans ce cas qu'on observe des pertes globales de l'ordre de 10% de la MSO après 300 j.

Pour estimer l'épaisseur optimale d'un film de polyéthylène sur un silo horizontal-couloir, on a utilisé les données économiques suggérées par Savoie (1988). Selon ce dernier, le prix du film polyéthylène peut être estimé comme suit : C_p = (0,102 + 21,95 y) où C_p est le coût total du film (\$/m^2), et y est l'épaisseur du film (cm). On suppose aussi que 1 kg de matière sèche oxydable de fourrage vaut 0,10 \$. Après transformation, on obtient la figure 5 qui représente les

pertes dues à l'oxydation de la MSO ($/m^2) et les frais pour le film en fonction de l'épaisseur du film. L'épaisseur du film optimale est celle qui minimise la somme de la fonction $C_p(y)$ et les pertes d'oxydation. Cette relation est présentée sur la figure 6. On peut voir que l'épaisseur optimale dépend de la période de conservation. Ainsi pour une période inférieure à 500 h (21 jours), la couverture n'est pas économique: son coût est plus élevé que la valeur des pertes. Toutefois, avec l'augmentation de la période de conservation, on observe que la solution optimale tend vers un film de plus en plus épais. Pour une période de 1000 h (environ 40 j), aucune couverture ou une couverture de 0,01 cm donnent à peu près le même résultat économique. Pour une période de 3000 h (125 j), un film de 0,01 ou 0,015 cm donnent le même coût global. Pour une durée d'entreposage de 7000 h, il est plus économique d'utiliser un film de 0,02 cm.

En conclusion, le modèle reflète l'infiltration de l'air dans un silo horizontal en fonction du temps et de la profondeur. Sans couverture, les pertes sont très importantes dans la couche supérieure de 0 à 10 cm, en particulier. Dans un silo profond de 3 m sans couverture, on peut s'attendre à plus de 10% de pertes de matière sèche oxydable après 300 j. Avec une couverture de polyéthylène, les pertes sont inférieures à 2% pour la même durée d'entreposage. Ces résultats montrent que de futurs biofilms ou couvertures organiques ne devraient pas coûter plus de 8% de la valeur de l'ensilage, et cela à condition d'être aussi étanches qu'un film de polyéthylène de 0,02 cm d'épaisseur. Des biofilms moins étanches devraient coûter encore moins chers pour être justifiés.

RÉFÉRENCES

Bolsen, K.K. 1997. Issues of top spoilage losses in horizontal silos. Proceedings from the North American Silage Conference: 137-149. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY.

Bodman, G.R. and B.J. Holmes. 1997. Managing and designing bunker and trench silos. AED 43 (18 pages), Midwest Plan Service, Ames, IA.

Brusewitz, G.H., R.L. Huhnke and E.M. Barnes. 1991. Performance of Nutri-Shield in protecting bunker-stored silage. Applied Engineering in Agriculture 7(5):515-519.

Buckmaster, D.R., C.A. Rotz and R.E. Muck R.E. 1989. A comprehensive model of forage changes in the silo. Transanctions of the ASAE 32(4): 1143-1152.

Holmes, B. 1998. Bunker silo cover alternatives. Focus on Forage. Vol. 1, No. 6. Accessed at www.uwex.edu/ces/crops/uwforage/Bunker_Silo_Covers.htm.

Jakob, R. Et L. Van Caenegem. 1994. Construction et technique du silo-couloir: une alternative judicieuse au silo-tour. Rapport FAT no 438 (13 pages). CH-8356 Tänikon, Suisse.

Pelletier F., J.B. Proulx et N. Roy. 2000. Revue de littérature sur les silos horizontaux. Projet d'ingénierie GRR-21282. Université Laval, Ste-Foy.

Pitt R.E. 1986. Dry matter losses due to oxygen infiltration in silos. J. Agric. Engng Res. 35(2): 193-205.

Rees D.V.H., E. Audsley E. And M.A. Neale. 1983. Some physical properties that affect the rate of diffusion of oxygen into silage. J. Agric. Sci., Camb. 100: 600-605.

Savoie P. 1988. Optimisation of plastic covers for stack silos. J. Agric. Engng Res. 41(1):65-73.

Savoie, P. et J.C. Jofriet. 1998. Entreposage des ensilages. Compte rendu du colloque sur les ensilages: 19-55. C.P.V.Q. inc., Québec.

Strang G. and Fix G.J. 1973. An analysis of the finite element method. Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs, N.J.

Wood J.G.M. and J. Parker. 1971. Respiration during the drying of hay. J. Agric. Engng Res. 16(3): 179-191.

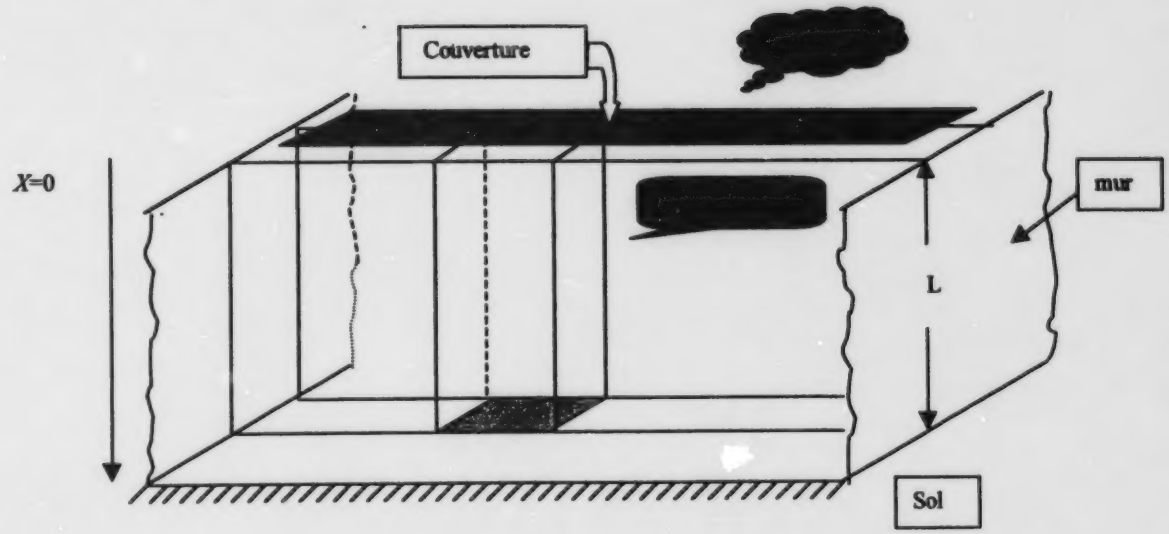


Figure 1. Schéma d'un silo horizontal

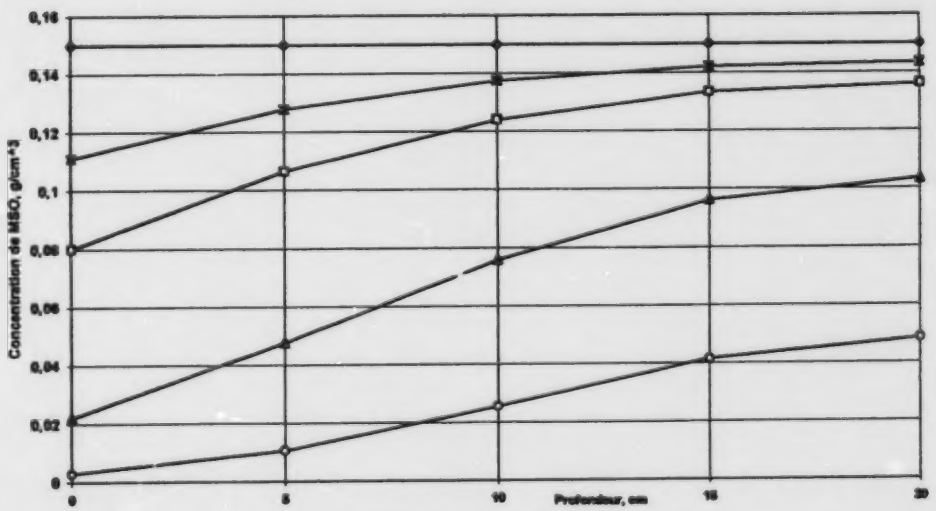


Fig.2. Concentration de matiere seche oxydable (aucune couverture)

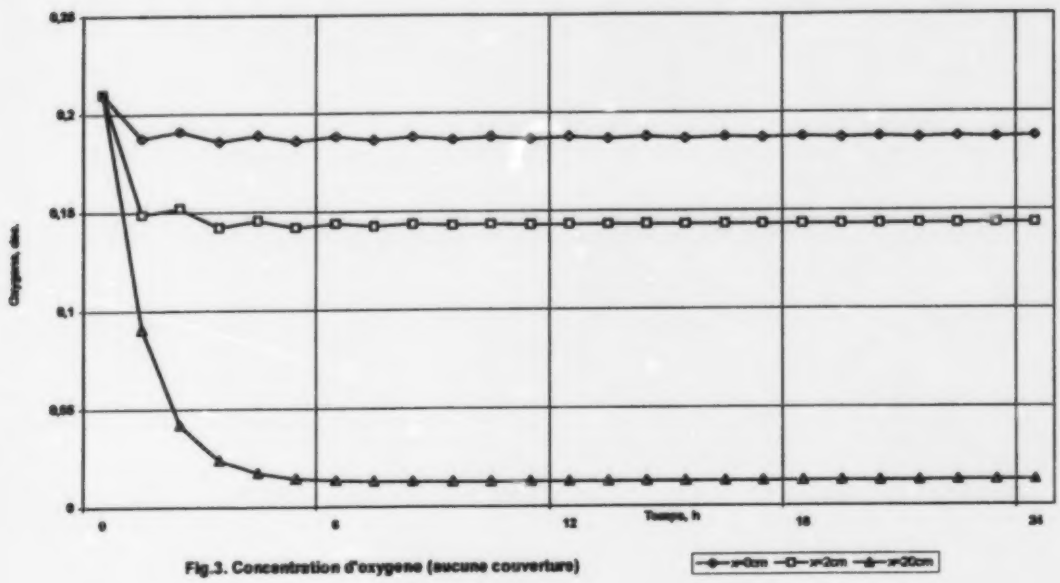


Fig.3. Concentration d'oxygene (aucune couverture)

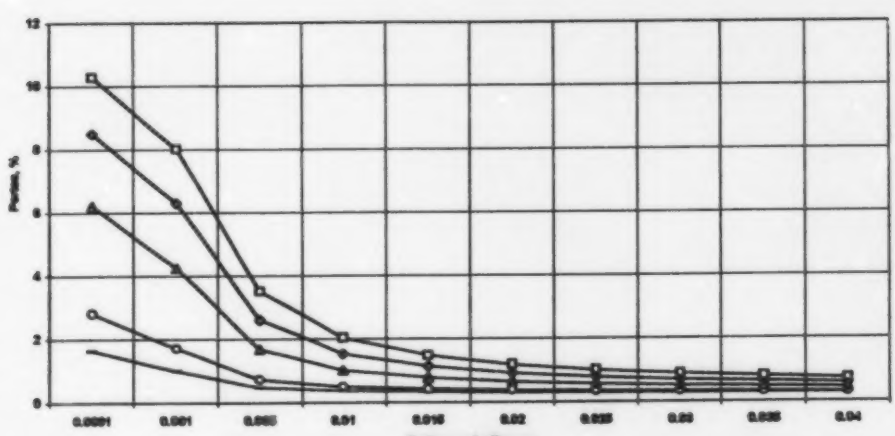
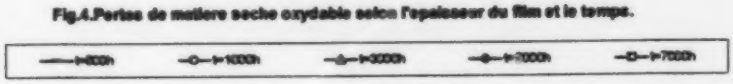


Fig.4.Pertes de matiere seche oxydable selon l'epaisseur du film et le temps.



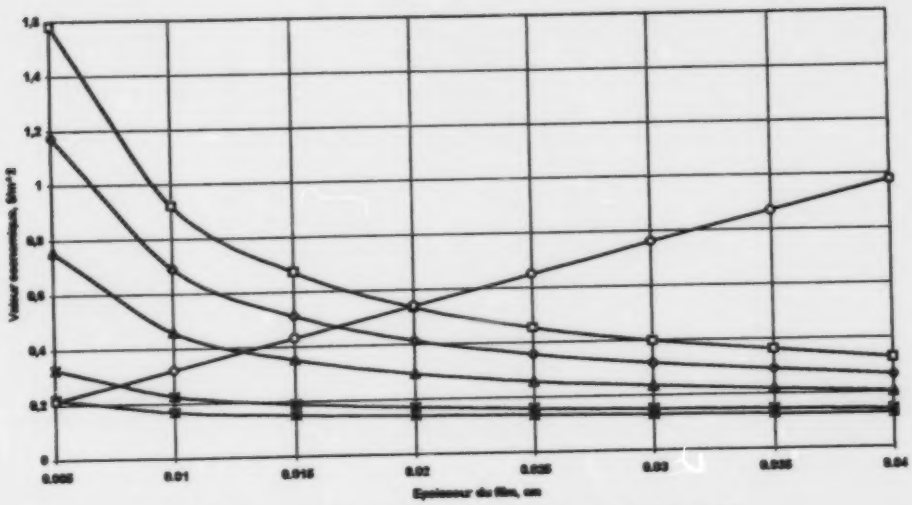


Fig.5. Valeur economique des pertes et prix du film par unite de surface du silo.

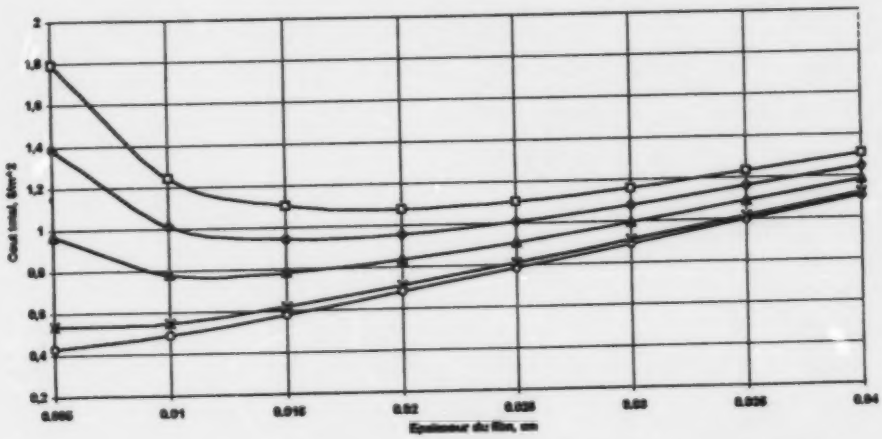
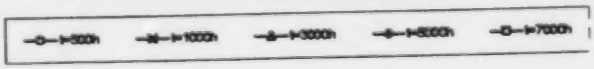


Fig.6.Cout total des pertes et du film de polyethylene par unite de surface du silo.



21 mars 2001
10h25 à 12h00

Thème 2 : Séchage des aliments

Modératrice : C. Vachon

ADVANCES IN HEAT-PUMP DRYING OF AGRI-FOOD PRODUCTS

Venkatesh Sosle[1], G.S. Vijaya Raghavan and R. Kittler[2]

[1]Deptartment of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University,
Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, H9X 3V9 < vsosle@po-box.mcgill.ca >
[2]Dectron Inc., 4300 boul. Poirier, St-Laurent, Quebec, H4R 2C5

ABSTRACT

The use of heat pump dehumidifiers to assist drying holds the promise of achieving an efficient process with multiple benefits. Basically, the system recovers the latent heat of evaporation, otherwise lost in the exhaust and puts it back in the drying air stream, and in the process, increases the moisture bearing capacity of the air either/both by drying the air by dehumidification or/and raising its temperature. This leads to drying being carried out at lower temperatures and with lesser fuel consumption, thus achieving improvements in efficiency, quality of the final product as well as the environmental impact.

The study at McGill University involves using a modified domestic heat pump dehumidifier unit for drying of agri-food products. As opposed to developing a specialized unit for the sole application of drying, the study makes use of a slightly modified unit, which can be adopted, for the drying system, while maintaining its primary potential for domestic applications. This makes the unit versatile and economically attractive.

Experiments carried out over the previous year have shown that the system has good prospects for application in the field. Apple rings were dried in a completely closed cycle of air circulation down to 12% moisture content (w.b.). The temperature profile of the air during the drying showed a gradual increase from an initial of 18°C to a final range of 27-30°C. The drying was completely independent of the ambient conditions, except for the negligible variations induced due to uninsulated parts of the ductwork. The quality of the product was deemed excellent, with no colour damage or flavour degradation.

However, the process does not seem to be economically desirable if carried out completely under closed conditions, due to the drying kinetics. The drying rate is rapid over the first hour when the amount of free moisture is high over the cut surfaces of the product. This is the period when the heat pump dehumidifier is operating at its highest efficiency. As the moisture content of the product decreases, the drying rate falls drastically and the proportion of the sensible heat recovered at the evaporator of the heat pump increases. The process loses its efficiency from this point onwards and the cost of removal of water begins to increase. However, the process might still be economically viable if it is used for drying of heat sensitive products with high economic value. This needs to be investigated further.

A careful drying regime needs to be planned to harvest the potential of the heat pump dehumidifiers in drying systems. Additional energy input in the form of microwaves or infrared heating will enable the efficient operation of the system. Inspite of its drawbacks, the environmental benefits of the HPD assisted drying systems make it a strong candidate for the expedient technologies of the coming years.

SÉCHAGE DE LA DRÊCHE DANS UN SÉCHOIR À LIT FLUIDISÉ PULSÉ

Michel G. Poirier, Tadeusz Kudra et Radu Platon

Ressources naturelles Canada, Laboratoire de recherche en
diversification énergétique de CANMET, Varennes, Québec, J3X 1S6
< mpoirier@NRCan.gc.ca >

RÉSUMÉ :

Le Laboratoire de recherche en diversification énergétique de CANMET (LRDEC) a développé le séchoir à lit fluidisé pulsé (SLFP) pour le séchage de matériaux granulés. Ce nouvel appareil permet la fluidisation de matériaux de formes irrégulières et/ou de granulométries larges avec des débits d'air de 30 à 50% inférieurs à ceux utilisés pour les séchoirs à lit fluidisé conventionnel. En raison d'un bon contrôle de température et de courts temps de séchage, le SLFP conduit à des produits de qualité supérieure et à des systèmes de dimension réduite de moitié comparés aux séchoirs de type convoyeur actuellement employés. Un SLFP de 0,6 m^2 de surface de grille a été construit au LRDEC et utilisé afin de démontrer les avantages de cette technologie pour le séchage de différents matériaux, notamment pour les fruits, les légumes et les résidus agroalimentaires.

Les grandes brasseries canadiennes doivent disposer de plus de 100 000 tonnes de drêche (base humide) par année. Ce résidu contient une proportion importante de protéines et il est utilisé comme nourriture pour les animaux. Présentement, la drêche est vendue et transportée à l'état humide (environ 75% d'eau) car il n'existe pas de technologie de séchage rentable. Le LRDEC a donc entrepris, avec la participation financière d'Enbridge Consumers Gas, une étude visant à démontrer que le SLFP est une technologie appropriée au séchage de la drêche.

La drêche humide et sèche a été caractérisée. Des mesures de cinétique de séchage sous atmosphère contrôlée ont été effectuées pour déterminer le temps de séchage à des températures allant de 120 à 180°C. Le SLFP de 0,6 m^2 du LRDEC a été utilisé pour réaliser des tests de séchage de drêche en modes discontinu et continu. La qualité du produit séché et la productivité de la technologie SLFP ont été déterminées. Les résultats obtenus seront présentés et discutés.

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF OSMOTIC DEHYDRATION

Stefan Grabowski and Michele Marcotte

Food Research and Development Centre, Agriculture and Agri-food Canada
St-Hyacinthe, Québec, J2S 8 E3 < grabowskis@em.agr.ca >

INTRODUCTION

Improvement of the final product quality and energy savings are the most important advantages of osmotic dehydration (OD) in application to food products. In this paper, fundamentals and prior applications of OD as well as general description of the results of our industrial-scale development and application of OD to the cranberry dehydration process are presented.

FUNDAMENTALS OF THE PROCESS

Chemical potential difference is a driving force for all mass transfer operations. For liquid solutions, higher concentration of soluble substances gives higher chemical potential and a higher osmotic pressure (Π) which is a measure of this potential. Van't Hoff equation theoretically describes the osmotic pressure of the water solution of osmo-active substances (solute) such as salt, sucrose, fructose, etc.

$$\Pi = (n/V_s)\, RT \qquad (1)$$

where : n is the number of mols of solute, V_s is the volume of the solution, R is the gas constant and T is the absolute temperature.

When two solutions of different osmotic pressures Π_1 and Π_2 are divided by a semi-permeable membrane (i.e. permeable for low-molecular-size particles, such as water and non-permeable for large-size molecules, such as sugars), a migration of the low-molecular-size component takes place (**Fig. 1A**) until an equilibrium is reached. Cellular membranes of fruits, vegetables, meat and other biological substances are such the semi-permeable membranes and OD process (sometimes called Dewatering-Impregnation-Soaking "DIS" process) can be achieved. In a reality, not only low-molecular-size substances migrate through the biological membrane but also some other large-molecular-size components migrate too [1-4]. Thus, osmotic process is a combination of dehydration process from the cell interior and some infusion of the solutes, such as sugars, salt, etc., into the cells (**Fig. 1B**). Three parameters characterize kinetics of the osmotic process: Water Loss (WL), Solid Gain (SG) and Weight Reduction (WR) - all in g/100 g of initial mass :

$$WL = [(\text{Initial Moisture} - \text{Actual Moisture})/\text{Initial Gross Mass}] \times 100 \qquad (2)$$

$$SG = [(\text{Actual Solids} - \text{Initial Solids})/\text{Initial Gross Mass}] \times 100 \qquad (3)$$

$$WR = WL - SG \quad (4)$$

Additionally, the ratio of Water Loss to Solid Gain is defined as an efficiency of osmotic dehydration

$$Pe = WL / SG \quad (5)$$

For some foods (many fruits and vegetables, fish and meat), dehydration is the only objective for osmotic process while for others, for example cranberry, blueberry, etc., sugar (or other additives) infusion into berries plays a very important role in improving the taste. To reduce solid gain, special surface protection substances were tested. For example, by covering the papaya slabs with chitosan film, an increase of the osmotic dehydration efficiency by factor of 10 was achieved [5]. In almost all cases, small streams of natural substances such as organic acids, sugars, mineral salts, vitamins, etc., leak from the food into osmotic solution.

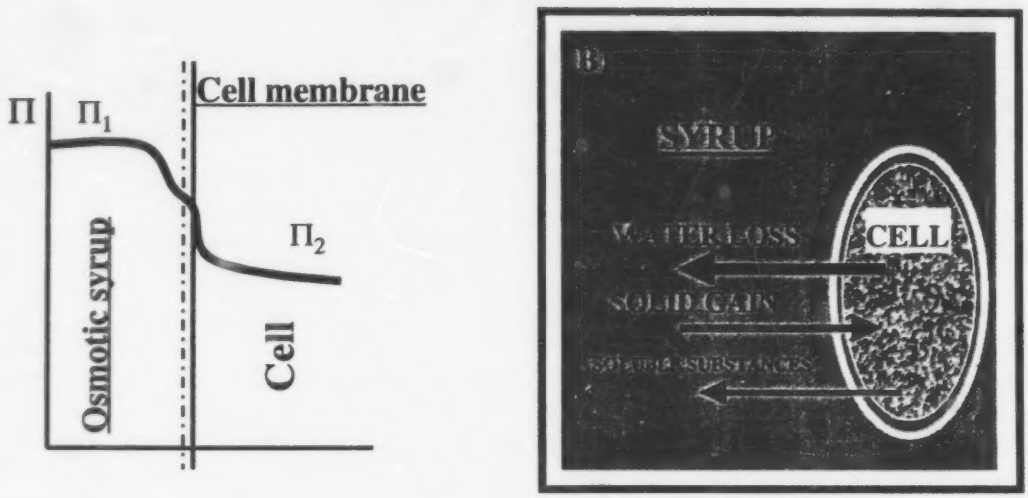


Fig. 1 Graphical representation of osmotic dehydration (OD) of biological materials.

PRIOR RESEARCH AND APPLICATIONS

Based on the literature review [1- 4], it can be concluded that the mass transfer rate in OD is influenced by the following variables:

1) Character of the dehydrated material (type, shape, size, porosity, etc.)
2) Osmotic pressure of the solution (syrup) as a function of :
   a) Type of the solute, i.e. solute osmosity (**Table 1**);
   b) syrup concentration;
   c) additives and preservatives;
3) Temperature and hydrodynamic conditions (mixing, pumping, etc.);
4) Food-to-solution weight ratio.

Small particle size of the food, high concentration of the osmotic syrup, optimal temperature (not too high – because of possible damage of food structure and not too low – because the

process will be too slow), intensive mixing of the syrup, and low food-to-syrup weight ratio (1:4 or 1:5) are positively influencing the mass transfer intensity during OD (for both, dehydration and infusion). Among the typical osmotic agents, the best dehydration effect, described by the osmosity, is NaCl (**Table 1**). However, only low concentrations of salt are acceptable by consumers (vegetables, fish and meat only).

TABLE 1. Comparison of the Osmosity* of Different Solutes (after [1])

No.	Solute	Osmosity, S at 10% mass	Osmosity, S at 25% mass	Osmosity, S at other concentr.
1.	Citric acid	0.327	0.98	
2.	Ethanol	1.282	3.78	4.58 (at 30%)
3.	D-fructose	0.338	1.045	
4.	D-glucose	0.341	1.066	
5.	Maltose	0.180	0.574	
6.	Sodium chloride	1.832	5.085	1 (at 5.63%)
7.	Sucrose	0.181	0.585	1.276 (at 40%)

**Osmosity (S) of the solute is defined as a molar concentration of NaCl (in g-mol/L) having the same osmotic pressure as that of given solution.*

Fig. 2 presents an example of osmotic process kinetics for cranberries cut into halves immersed in 65 Brix sucrose solution at 45°C in batch system.

Osmotically dehydrated foods have a water activity (a_w) in the range of 0.85-0.9 and are microbiologically unstable until stored in a cold room or preserved otherwise. Thus, normally a second step of dehydration has to be applied to reduce water content to a stability range, i.e. a_w about 0.5. Typical air dryers, freeze dryers, solar and vacuum dryers are there successfully applied.

Mainly, small-scale OD installations are practically applied. The basic reason for this is the problem of recycling large volumes of osmotic syrup diluted during the osmotic process. A use of the after-processing syrup as an ingredient of the other foods (juices, concentrates, table syrups, etc.) is there the best solution. Continuous filtration, vacuum evaporation and final adjustment of the whole syrup volume by adding a small portion of the new concentrated solution (about 7%) is another proposed solution [6].

DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL-SCALE CRANBERRY DEHYDRATION PROCESS

Canada (and especially Québec) is the second largest cranberry grower in the world (next to USA). In response to a growing consumer demand, a new type of cranberry product, i.e. dried cranberries, as developed in cooperation between the largest cranberry grower in Quebec, Atoka Cranberry Inc. of Manseau and Food Research and Development Centre of Agriculture and Agri-

food Canada in St. Hyacinthe [7]. About 700 000 kg/year of fresh or frozen cranberries will be dried using the proposed technology.

Based on the principles of OD, a very effective continuous contactor for OD process was developed and, after scale-up, applied in the industrial installation. **Figure 3** presents a picture of this contactor (pilot-scale size). The main part of this system is a perforated wheel divided into 24 compartments among which 12 are submerged in the osmotic syrup. During the rotation of the wheel, the new portions of the cranberries are subjected to osmotic process with the same condition of temperature, concentration and processing time. This gives a product of high uniformity and quality.

The other critical point of this technology is the pretreatment of the cranberries before OD because the cranberry skin is covered by a layer of wax that is very difficult to remove. Consecutive study, [8], showed that berries cut into halves give the best quality product in assumed practical time of the osmotic process (4 h) and consequently in air drying during the second step of the proposed technology. Many other fruits, vegetables and biological materials can be dehydrated using this method.

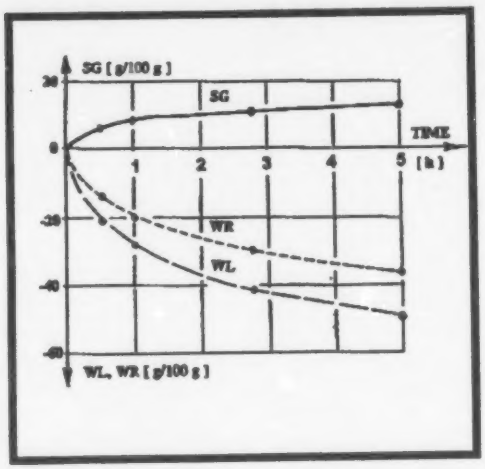


Fig. 2 Example of the kinetics of OD for cranberries cut into halves (periodic system, 45°C).

Fig. 3 Picture of continuous OD system (Food Research and Development Centre, St-Hyacinthe, Canada).

CLOSING REMARKS

Consumers demand for new high quality foods is a driving force for developing new or modify existing processing technologies. Osmotic dehydration is one of the emerging technologies, still with very limited industrial-scale applications. A big potential in application of this process, similarly to that of cranberry drying, exists in the food processing industry.

REFERENCES

[1] Grabowski, S. and Mujumdar, A.S. (1992) Solar-assisted osmotic dehydration. In: Drying of Solids. Ed. A.S. Mujumdar, International Science Publisher, NY, pp. 367-404.

[2] Marcotte, M. and LeMaguer, M. (1991) Repartition of water in plant tissues subjected to osmotic process. J. Food Process Eng. 13, 297-311.

[3] Raoult-Wack, A. L., Lenart, A. and Guilbert, S. (1992) Recent advances in dewatering through immersion in concentrated solutions. In: Drying of Solids. Ed. A.S. Mujumdar, International Science Publisher, NY, pp. 21-51.

[4] S. Grabowski, and M. Marcotte (2001) A pretreatment efficiency in osmotic dehydration of cranberries. In: *Transport Phenomena in Food Processing*, Ed. by G.V. Barbosa-Canovas (in review).

[5] Argaiz-Jamet, A. and Cortez-Larios, O.M. (2000) Chitosan film effect on papaya osmotic dehydration. Proceedings of the Eight International Congress on Engineering and Food, Puebla, Mexico, 9-13 April, 2000, Paper G-25, p. 217.

[6] Giroux, F., Castillo, M. and Valdez-Fragoso A. (2000) Recycling of concentrated solutions in OD processes and application to their automated control. Proceedings of the Eight International Congress on Engineering and Food, Puebla, Mexico, 9-13 April, 2000, Paper O-012, p. 113.

[7] Anonymous (2000) Cranberries get the full treatment, Agvance, Agriculture and Agri-Food Canada Journal, Research Branch, Vol. 8, No. 2, pp. 1 and 10.

[8] Grabowski, S. and Marcotte, M. (1999) The pretreatment effect on osmo-convective dehydration of cranberries. ITF'99, Chicago 24-28. July, 1999, Paper No. 22D-43, Book of Abstracts, p. 55.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the grant from the Office of Energy Research and Development (as a PERD-project). The assistance of Marcel Tanguay, Saadia Triki, Stephane Burguess and François Brunet in carrying the experiments and discussion is gratefully acknowledged.

OSMOTIC DRYING KINETICS OF APPLE SLICES

N.H. van Nieuwenhuijzen, M.R. Zareifard and Hosahalli S. Ramaswamy

Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Macdonald Campus of McGill University, Ste-Anne de Bellevue, Quebec, H9X 3V9 < rzareifard@yahoo.com >

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the osmotic drying kinetics of cylindrical slices of apples as influenced by particle size at different concentrations of sucrose solutions and different temperatures. Osmotic drying was carried out, with cut apple cylinders of three different sizes (12, 17 and 20 mm diameter), all with a length to diameter ratio of 1:1, in a well agitated large tank containing the osmotic solution at the desired temperature. The solution to fruit volume ratio was kept greater than 60. A central composite rotatable design (CCRD) was used with five levels of sucrose concentrations (34-63°Brix) and five temperatures (34-66°C). Kinetic parameters included weight loss, moisture loss and solid gain. Rates of moisture loss and solid gain generally increased with increasing treatment time and temperature and concentration of osmotic solution, and decreased with increasing the sample size. The parameter "osmotic drying time to achieve a given moisture loss" obviously showed the opposite. Composite models were developed to describe the effect of process variables and particle size on the drying behavior of apple slices.

ÉVALUATION DE MÉTHODES DE SÉCHAGE SUR DES CANNEBERGES PRÉ-DÉSHYDRATÉES PAR OSMOSE

Claudia Beaudry, G.S.Vijaya Raghavan et Chandra A. Madramootoo

Département de génie agricole et des biosystèmes, Université McGill,
Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9 < claudiabeaudry@globetrotter.net >

RÉSUMÉ :

Depuis quelques années, la production de canneberges a augmenté d'une manière significative au Canada, particulièrement au Québec. En plus de retrouver les canneberges fraîches sur le marché dès la récolte et jusqu'à la période des Fêtes, il est également possible de se procurer des canneberges congelées et des produits transformés tels le jus de canneberges et la sauce aux canneberges sur une base annuelle. De plus, la demande en canneberges séchées a augmenté depuis quelques années puisque ce nouveau produit est utilisé dans plusieurs produits transformés tels les céréales, les barres de type granola et les préparations pour boulangerie. Cette nouvelle demande en canneberges séchées crée donc un besoin d'examiner les techniques disponibles pour le séchage d'un tel fruit.

La canneberge, ayant une peau très peu poreuse et épaisse, semble nécessiter un pré-traitement avant même de la faire sécher. Les pré-traitements physiques et chimiques peuvent être considérés, soit par la rupture de la peau de la canneberge (en coupant le fruit en deux ou en perçant de petits trous dans la peau), ou par le trempage du fruit dans une solution alcaline, ce qui améliore la diffusion de l'eau durant le séchage.

Un second pré-traitement s'avère nécessaire avant le séchage des canneberges, afin de réduire le goût amer des fruits. Les canneberges doivent être plongées dans une solution osmotique, telle une solution de sucrose ou de fructose, dans le but de déshydrater le fruit par osmose. Les tranferts de masse présents lors d'une telle déshydratation par osmose comprennent le transfert d'eau provenant des fruits jusqu'à la solution osmotique, le transfert de la substance osmotique vers le fruit, ainsi que le transfert de substances solubles provenant du fruit jusqu'à la solution osmotique. Différents paramètres, tels l'agent osmotique, le rapport fruit:sucre et la durée de la déshydratation, doivent être considérés lors d'une déshydratation par osmose.

Une fois les conditions de pré-traitement établies, quatre méthodes de séchage ont été testées pour la canneberge, à savoir l'air chaud, le séchage par le vide, la lyophilisation et la combinaison air chaud et micro-ondes. Ces méthodes offrent différents avantages et inconvénients qui dépendent souvent de la nature du produit séché. Ces caractéristiques ont été déterminées pour la canneberge.

MODÈLE NUMÉRIQUE POUR LA SIMULATION DE LA LYOPHILISATION : OPTIMISATION ET ÉTUDE DE L'IMPACT DE CERTAINS PARAMÈTRES

Seddik Khalloufi et Cristina Ratti

Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval,
Ste-Foy, Québec, G1K 7P4 < seddik.khalloufi@fsaa.ulaval.ca >

RÉSUMÉ :

La lyophilisation est une technique de déshydratation sous vide. Son avantage réside dans la qualité supérieure des produits finis. Un des problèmes fréquemment rencontrés lors de ce procédé est le phénomène d'affaissement connu aussi sous le nom de Collapse. D'après la littérature, le paramètre déterminant et responsable de ce phénomène serait la température de transition vitreuse (Tg).

Lors de la lyophilisation, nous assistons à la formation d'un front de sublimation séparant la matrice à lyophiliser en deux zones : l'une congelée et l'autre relativement sèche. Dans chaque zone, la température évolue de façon différente et très dépendante des propriétés intrinsèques du produit et des caractéristiques de l'équipement de la lyophilisation. Afin d'éviter que la température du produit, lors de la lyophilisation, n'atteigne une valeur critique (Tg), il est indispensable de connaître l'évolution de ce paramètre ainsi que la teneur en eau au sein de la matrice traitée.

L'objectif du présent travail était de développer un modèle mathématique de simulation de la cinétique de la lyophilisation et des profils de températures au sein du produit. La validation expérimentale du modèle montre que les prédictions représentent bien les résultats obtenus en laboratoire pour deux produits alimentaires (pomme et pomme de terre). L'impact de certains paramètres sur la cinétique de la lyophilisation a aussi été étudié. En guise de conclusion, le modèle mathématique ainsi développé pourrait être utilisé pour des fins d'optimisation telles que le design des équipements et le suivi de l'évolution des températures et de la teneur en eau pour éviter le phénomène d'affaissement des produits lors du processus de déshydratation.

21 mars 2001
10h25 à 12h00

Thème 3 : Informatique et contrôle en agroalimentaire

Modérateur : W. Pelletier

ANALYSE ET GESTION DES DONNÉES DE RENDEMENT - BILAN DE TROIS ANNÉES

B. Panneton, M. Brouillard et T. Piekutowski

Centre de recherche et de développement en horticulture, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 430 Boul. Gouin, St-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6
<pannetonb@em.agr.ca>, <brouillardm@em.agr.ca>, <piekutowskit@em.agr.ca>

RÉSUMÉ

En agriculture de précision, on cherche à distinguer la variabilité dans les rendements qu'on peut attribuer aux conditions particulières du terrain de celle qui résulte des pratiques culturales ou de l'historique de l'utilisation de la parcelle. Les méthodes disponibles pour faire la synthèse de données de rendement s'étalant sur plusieurs années ne permettent pas de tenir compte de ces derniers facteurs. Une méthode adaptée à cette situation a été développée. Il s'agit d'un algorithme de classification supervisée faisant appel à la logique floue. Les données de rendement annuel sont traitées à l'aide de fonction d'appartenance qui peuvent être appliquées de manière telle que les facteurs liés à l'historique de la parcelle ou aux pratiques culturales peuvent être pris en compte. Pour chaque année, il en résulte un jeu de trois cartes d'appartenance. Chacune de ces trois cartes est combinée aux cartes correspondantes d'autres années en utilisant des règles plus ou moins élaborées. Finalement, des règles de classification sont appliquées pour produire une carte-synthèse montrant les régions du champ où le rendement est stable dans le temps (SDT) et faible, SDT et typique pour la parcelle, SDT et élevé et instable dans le temps (IDT). Cette carte s'est avéré un outil important d'analyse visant à poser un diagnostic sur les fluctuations de rendement observées sur les cartes annuelles de rendement.

INTRODUCTION

Le rendement représente l'extrant des productions végétales et cette mesure est donc essentielle pour évaluer la pertinence des pratiques culturales. Avant l'éclosion de l'agriculture de précision, le rendement était évalué à l'échelle de la parcelle. L'agriculture de précision qui, en anglais, a déjà reçue l'appellation "farming-by-the-foot" a considérablement réduit l'échelle à laquelle le rendement peut être évalué. Cette question d'échelle n'est pas simple et ce n'est pas le capteur de rendement qui peut enregistrer une donnée à chaque mètre le long du parcours de la machine qui doit fixer l'échelle pertinente d'analyse pour les données de rendement. Pour une parcelle, l'identification des zones à l'intérieur de laquelle la culture répond de façon homogène est un moyen permettant de mieux définir l'échelle pertinente (Lark et Stafford, 1998).

Un certain nombre d'approches ont été proposées pour faire une segmentation de la parcelle à partir des données de rendement. L'inspection visuelle d'une carte annuelle de rendement permet d'identifier des zones où le rendement est soit élevé ou plus faible. Cette répartition résulte de l'effet de facteurs intrinsèques (*e.g.* classe de sol) et de facteurs annuels (*e.g.* précipitations) (Nolin et al., 1997). Il n'est donc pas possible d'isoler l'effet des facteurs intrinsèques en ne se basant que sur une seule année de données. Blackmore et al. (1999) proposent de faire la

synthèse de données de rendement s'étalant sur plusieurs années en calculant la moyenne dans le temps pour chaque élément d'une grille superposée à la parcelle et la subdivisant en petites unités (de l'ordre de 10 m x 10 m). Les données de rendement sont préalablement mises à l'échelle en divisant le rendement pour chaque élément de la grille par le rendement moyen de la parcelle. Le coefficient de variation correspondant à chacune des valeurs moyennes calculées est aussi enregistré. Il en résulte deux cartes (moyenne et coefficient de variation) à partir desquelles des zones à rendement SDT-faible, SDT-élevé et IDT sont identifiées. Broos *et al.* (1999) proposent une approche similaire mais où les données brutes de rendement sont d'abord transposées de façon linéaire sur une échelle de un à cinq couvrant la gamme des valeurs de rendement pour l'année. Ces valeurs annuelles sont alors additionnées par chacun des éléments de la grille. Finalement, une classification est obtenue en supposant que les sommes de faible valeur correspondent à des points où le rendement et SDT-faible, les valeurs élevées à un rendement SDT-élevé et les valeurs intermédiaires à un rendement IDT. Lark et Stafford (1996) ont développé une méthode de classification non-supervisée faisant appel à la logique floue. Le résultat est une carte où chaque élément de la grille est assigné à une classe. La méthode de traitement comprend un algorithme et des règles de décision pour établir le nombre de classes. Cette méthode ne demande pas de formuler des hypothèses a priori. Elle cherche à identifier les zones (contiguës ou pas) dans la parcelle où la réponse de la culture est homogène. La méthode ne permet pas de connaître la nature de cette réponse. Une analyse subséquente doit être initiée pour la découvrir.

TRAITEMENT PRÉALABLE DES DONNÉES ANNUELLES DE RENDEMENT

Les données brutes de rendement à la sortie du champ doivent être filtrées pour éliminer des mesures erronées ou douteuses (Blackmore *et al.*, 1999). Il faut d'abord introduire un décalage dans les données pour tenir compte du temps de transit des produits récoltés entre la barre de coupe (*i.e.* leur position sur le terrain) et le capteur de rendement installé sur la machine de récolte. Cette étape doit être réalisée en premier. Le rendement humide est alors converti en rendement sec (14,5% d'humidité pour le maïs-grain et le soya). Finalement, une série de filtres est utilisée pour éliminer des données :

- Données dont la localisation est à l'extérieur de la parcelle ;
- Données pour lesquelles il n'y a pas de correction différentielle du GPS ;
- Données erronées sur la largeur de coupe (normalement, l'opérateur doit entrer cette donnée lors de la récolte; cette étape est souvent négligée.) ;
- Données dont la position est trop rapprochée de la donnée précédente (moins de 25 cm). Dans ces cas, le rendement calculé (poids mesuré ÷ (largeur×distance)) est imprécis ;
- Données pour lesquelles l'humidité mesurée du grain est trop haute (>40%) ou trop basse (<14,5%) ;
- Données pour lesquelles le rendement est nul ou trop élevé (maïs: >20 t/ha, soya: >10 t/ha) ;
- Une moyenne et un écart-type (E.T.) sont calculés en utilisant les points restants. Les points pour lesquels le rendement est en dehors de la plage comprise entre ± trois E.T. autour de la moyenne sont éliminés.

Par la suite, les données restantes sont utilisées pour calculer un semi-variogramme (Webster et Oliver, 1990). Un modèle est alors ajusté au semi-variogramme. Ce modèle sert à interpoler par krigeage (Webster et Oliver,1990) les données de rendement afin de les transposer sur une grille régulière dont chacun des éléments mesure 10 m x 10 m. Sur 17 des 21 parcelles étudiées, le meilleur modèle de semi-variogramme est un modèle exponentiel alors que sur les quatre autres parcelles, un modèle sphérique donnait un meilleur ajustement.

CLASSIFICATION DES DONNÉES DE RENDEMENT

Le traitement de séries pluri-annuelles de cartes de rendement a été abordé par le biais de méthodes de prise de décision. Une décision est le résultat d'un processus par lequel on arrive à choisir parmi des alternatives. Dans l'interprétation des cartes de rendement, l'identification de zones ayant des caractéristiques stables à mesure que les saisons passent est importante. De plus, pour ces zones stables, il est intéressant de déterminer si le rendement est généralement élevé ou faible. À partir de ces considérations, quatre classes ont été définies :

1. Rendement en général plus élevé que la moyenne;
2. Rendement en général moyen;
3. Rendement en général faible;
4. Rendement variable.

Trois classes sont réservées aux zones où le rendement tend à être stable année après année. Par rapport à une classification à deux niveaux (sous et au-dessus de la moyenne), le but est de faire ressortir plus clairement les zones où le rendement est nettement limité pour simplifier le processus de diagnostic. Les quatre classes constituent l'ensemble des alternatives. Le processus de décision doit donc permettre de classer chaque point du champ dans une de ces quatre classes.

Le processus de prise de décision comprend trois étapes: classification des données sur une base annuelle en rendement bas, moyen et élevé; agglomération des données de plusieurs années point par point et décision finale. Pour effectuer la classification sur une base annuelle, il faut d'abord définir les notions de rendement bas, moyen et élevé. Ces notions peuvent être définies de plusieurs façons. Pour éviter une définition rigide, l'approche par logique floue (Zhang et Benson, 2000) a été retenue. Avec cette approche, chaque point d'une carte annuelle de rendement reçoit trois valeurs indiquant son degré d'appartenance à une des trois catégories.

Le degré d'appartenance est calculé à l'aide des équations 1. Ces équations comprennent quatre paramètres définis à partir de l'histogramme des rendements pour la parcelle considérée (Fig. 1). Pour un rendement donné (axe horizontal sur la figure 1), la hauteur de l'histogramme (fréquence) est proportionnelle au nombre total de points où le rendement mesuré est égal à la valeur sur l'axe horizontal.

$$\text{Si } R \le a \quad \text{alors} \quad A_b = 1,\ A_m = 0,\ A_e = 0$$

$$\text{Si } a < R \le b \quad \text{alors} \quad A_b = \cos^2\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{R-a}{b-a}\right)\right],\ A_m = 1-\cos^2\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{R-a}{b-a}\right)\right],\ A_e = 0$$

$$\text{Si } b < R \le c \quad \text{alors} \quad A_b = 0,\ A_m = 1,\ A_e = 0 \qquad (1)$$

$$\text{Si } c < R \le d \quad \text{alors} \quad A_b = 0,\ A_m = \cos^2\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{R-c}{d-c}\right)\right],\ A_e = 1-\cos^2\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{R-c}{d-c}\right)\right]$$

$$\text{Si } d < R \quad \text{alors} \quad A_b = 0,\ A_m = 0,\ A_e = 1$$

où R : rendement ponctuel;
A_b: appartenance à la classe de rendement bas;
A_m : appartenance à la classe de rendement moyen;
A_e : appartenance à la classe de rendement élevé;
a, b, c, d : paramètres du classificateur (voir figure 1).

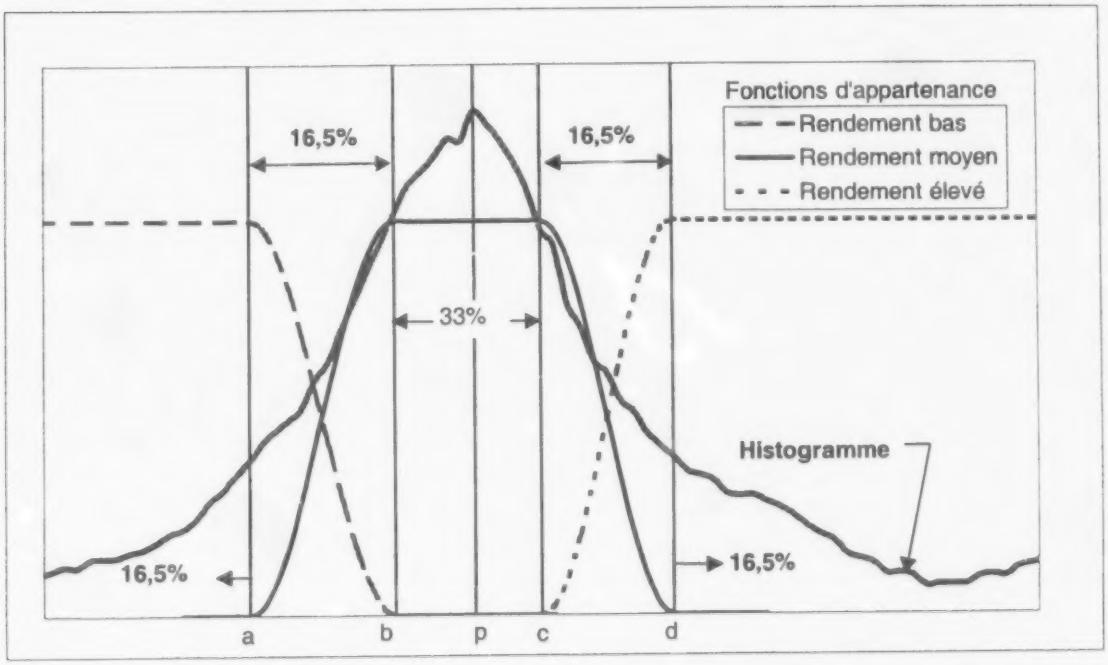


Figure 1 : Illustration des fonctions d'appartenance et de leurs paramètres.

Le mode de l'histogramme (*p* sur la fig. 1) est la valeur du rendement la plus fréquente dans la parcelle. Cette valeur est immédiatement sous le pic principal de l'histogramme. Habituellement, les histogrammes de rendement ont un pic majeur qui est bien défini. Des pics secondaires peuvent apparaître. Lorsqu'un pic secondaire est rapproché du pic principal et que leurs amplitudes sont comparables, les données de l'histogramme sont lissées à l'aide d'un filtre passe-bas (moyenne mobile) ayant une capacité filtrante suffisante pour qu'un seul pic principal

subsiste dans l'histogramme résultant. L'utilisation du mode de l'histogramme plutôt que de la valeur moyenne du rendement est indifférente lorsque l'histogramme est parfaitement symétrique. En pratique, cela est rare. Généralement, la forme générale de l'histogramme comprend deux composantes: une distribution d'allure symétrique centrée autour du mode à laquelle s'ajoute une longue queue de faible amplitude s'étendant vers des valeurs de faibles rendements. L'impact de cette asymétrie est que le rendement moyen est inférieur au mode. Dans ce contexte, le mode est un repère plus approprié pour définir le rendement typique du champ, c'est-à-dire le rendement que l'on rencontre le plus souvent à l'intérieur de la parcelle.

Les paramètres *a*, *b*, *c* et *d* sont obtenus à partir de la segmentation de l'histogramme. Cette segmentation est analogue à celle qui est faite, sur des distributions symétriques, en utilisant une mesure de dispersion (habituellement l'écart-type) pour définir un intervalle autour de la moyenne à l'intérieur duquel une proportion définie de la population se retrouve. Par exemple, pour une distribution normale, on retrouve 68% de la population à ±1 écart-type autour de la moyenne. Pour une distribution qui n'est pas symétrique, on obtient une définition analogue en identifiant une fréquence de référence pour laquelle la surface sous la courbe de l'histogramme, dans sa portion où les fréquences sont supérieures à la fréquence de référence, est égale à une proportion définie. Sur la figure 1 par exemple, les lignes verticales aux valeurs *b* et *c* font intersection avec la courbe de l'histogramme, de part et d'autre du mode, à la même valeur de la fréquence. La portion de l'histogramme comprise entre ces deux lignes regroupe 33% des points de rendement. De la même manière, les lignes *a* et *d* définissent une portion de l'histogramme regroupant 66% des données de rendement. Ces valeurs (33% et 66%) ont été choisies de façon arbitraire. Il semblait raisonnable qu'au minimum, la définition d'un rendement moyen ou typique repose sur le tiers des points de rendement. De la même manière, il semble raisonnable qu'une faible proportion (16,5%) des points définissant les extrémités de l'histogramme des rendements soit clairement identifiée comme des points de bas ou de haut rendement. Sur deux champs, des valeurs de 20 et 80% ont été utilisées et la classification résultante a été comparée à celle obtenue avec des valeurs de 33 et 66%, respectivement. Avec seulement deux années de données, cette comparaison a montré que le choix des valeurs avait peu d'effet sur le résultat final. Vu le nombre limité d'années de données de rendement, cette comparaison n'a pas été portée plus loin.

En appliquant les équations 1, pour chaque carte annuelle de rendement, trois cartes sont produites : une pour chaque fonction d'appartenance A_b, A_m et A_e (Fig. 2). Sur ces cartes, les points ont une valeur variant entre zéro et un. Plus la valeur se rapproche de un, plus il est vraisemblable que ce point appartienne à la classe correspondante.

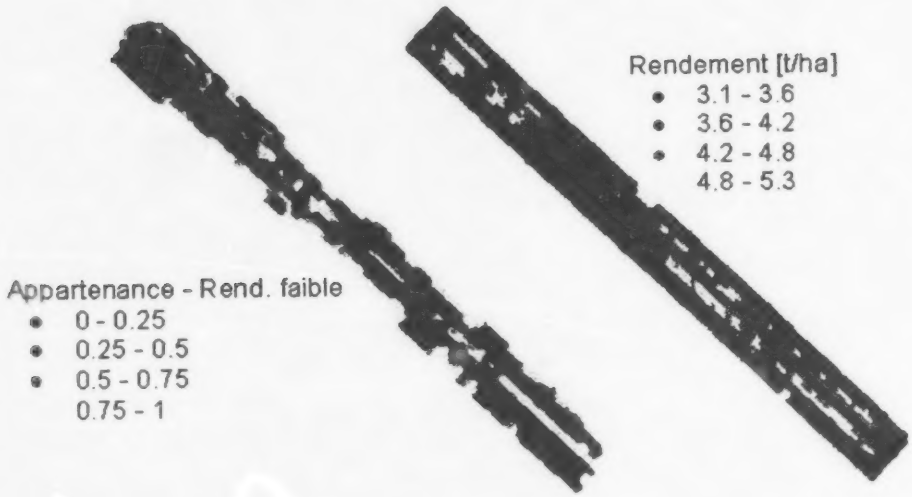


Figure 2 : Exemple de fonction d'appartenance, A_b.

Les données s'étalant sur plusieurs années sont ensuite mises ensemble en regroupant les cartes de fonction d'appartenance. Ainsi, pour un champ, on obtient trois cartes d'appartenance (A_b, A_m, A_e) faisant la synthèse des données acquises sur plusieurs années. Ce regroupement est effectué en appliquant les règles de la logique floue. Ces règles sont l'équivalent, en logique floue, des règles d'opération en logique binaire : "et", "ou" ... Pour notre application, trois règles ont été considérées. Le tableau 1 trace le parallèle entre les opérations booléennes qui sont familières et les opérations en logique floue qui sont correspondantes. En logique binaire, il est impossible de faire la moyenne entre deux valeurs ce qui est possible en logique floue. On peut classer les opérations du tableau 1 selon l'effet résultant sur la valeur de la fonction d'appartenance. Ainsi, le "et" est une opération qui conserve la valeur la plus faible, la moyenne est une opération intermédiaire alors que le "ou" ne conserve que la valeur maximale. D'une certaine manière, on peut concevoir l'utilisation du "et" comme une approche conservatrice. Par exemple, dans le cas de cartes de rendement et pour un point donné dans le champ, l'application du "et" ne retiendra que la valeur de la fonction d'appartenance correspondant à l'année où celle-ci est la plus faible, diminuant pour ce point, la vraisemblance qu'il appartienne à l'ensemble correspondant (rendement faible, moyen ou élevé). C'est donc une approche conservatrice puisqu'elle "disqualifie" plus facilement un point.

Tableau 1 : Équivalence des opérations de base - logique binaire versus logique floue

Logique booléenne (ou binaire)	Logique floue
a ET *b*	Min (*a*,*b*)
a OU *b*	Max (*a*,*b*)
	Moyenne (*a*,*b*)

Il a été possible d'observer les tendances décrites au paragraphe précédent concernant l'effet du choix de l'opérateur sur le résultat final. Toutefois, vu le peu d'années consécutives de rendement disponibles (normalement deux années pour une même culture), l'opérateur calculant la moyenne

a été retenu dans tous les cas. La figure 3 montre trois cartes illustrant la fonction d'appartenance à la catégorie des rendements faibles pour trois années et le résultat de la moyenne.

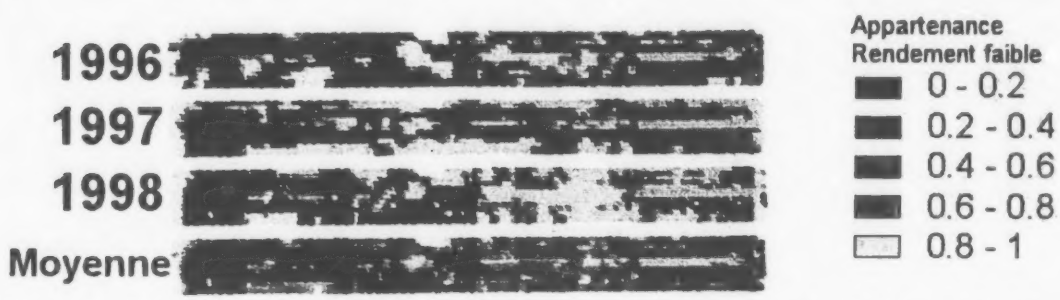


Figure 3 : Agglomération des fonctions d'appartenance - rendement faible à partir de 3 ans de données.

L'étape suivante de la classification consiste en l'application d'un seuil aux trois cartes d'appartenance. Ici encore, le peu de données disponibles n'a pas permis d'examiner sur l'effet de la valeur du seuil sur le résultat final. Un seuil de 0,5 a été appliqué à chacune des trois cartes. Lorsque la valeur de la fonction d'appartenance pour un point donné est inférieure à 0,5, ce point est exclu de la classe correspondante. À l'inverse pour des valeurs supérieures ou égales à 0,5, le point correspondant est inclus dans la classe correspondante.

La dernière étape consiste à regrouper les données provenant des trois cartes de fonction d'appartenance converties par l'application du seuil en une carte montrant les zones de rendement. La carte finale a quatre catégories. Un point est assigné à la catégorie "SDT - rendement faible" lorsqu'il a été inclus dans cette classe lors de l'application du seuil et qu'il n'a été inclus dans aucune autre classe. La même logique s'applique pour les catégories "SDT - rendement moyen" et "SDT - rendement élevé". Autrement, un point se retrouve dans la catégorie "IDT".

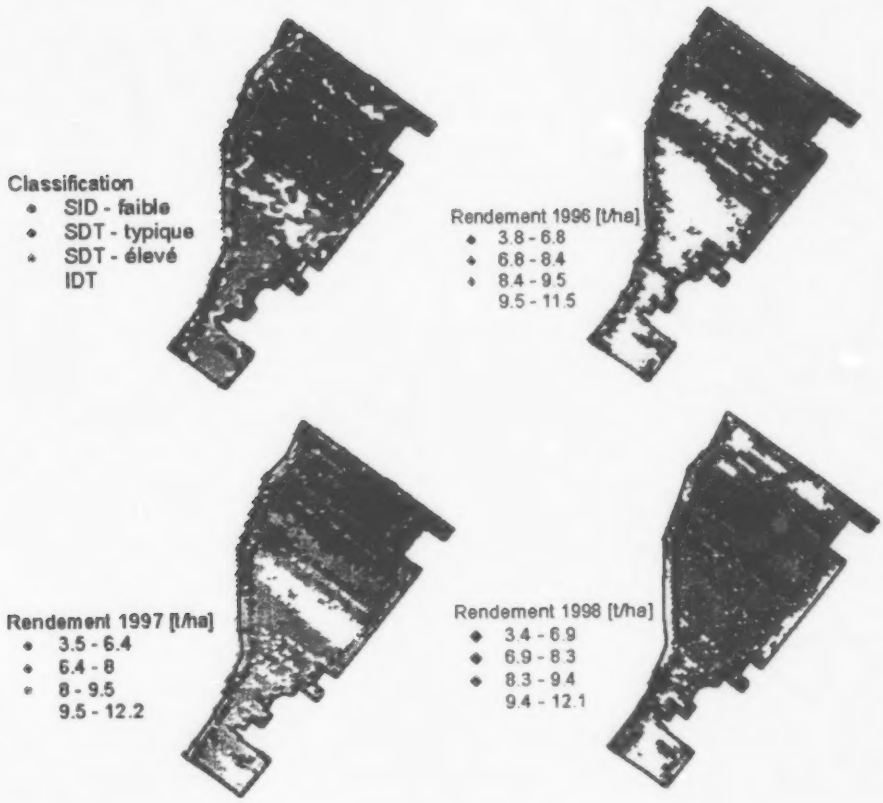


Figure 4 : Exemple de classification finale.

Stratégie d'utilisation

En principe, la méthode peut être utilisée pour combiner des données de rendement obtenues sur des cultures différentes pratiquées sur un même champ. On peut formuler l'hypothèse que deux cultures qui subissent le même cycle climatique (*i.e.* saisons de croissance du semis à la récolte qui se superposent) peuvent être mises ensemble lors de la classification. Faute de données, cette hypothèse n'a pu être vérifiée.

Sur le plan pratique, il arrive souvent qu'une parcelle ne puisse pas être considérée comme une entité pour des raisons liées aux pratiques culturales: semis réparti sur plusieurs jours, utilisation de variétés différentes, etc. Lorsqu'elle est présente, cette variabilité artificielle masque la variabilité naturelle ou intrinsèque que l'on cherche à faire ressortir. La variabilité artificielle a été prise en compte en appliquant la première partie de la méthode de classification (calcul de la fonction d'appartenance pour chaque point) sur des zones de la parcelle ayant subies des traitements jugés uniformes. Les paramètres des fonctions d'appartenance sont alors calculés à partir de l'histogramme construit à partir des données localisées à l'intérieur d'une zone traitée

uniformément. Par la suite, la méthode de classification s'applique sans tenir compte de ces zones.
Plusieurs paramètres interviennent dans la méthode. Les premiers sont les paramètres qui définissent la forme des fonctions d'appartenance : a, *b*, *c* et *d*. Quelques expériences ont été faites en variant la valeur de ces paramètres et comme il a été mentionné plus haut, il semble que la méthode de classification ne soit pas très sensible au choix de ces paramètres. Cet aspect mériterait toutefois une analyse plus approfondie lorsque des données de rendement supplémentaires soient disponibles.

Le choix de l'opération logique a une influence importante sur le résultat final. De plus, il y a un lien étroit entre ce choix et celui de la valeur du seuil qui est utilisée pour effectuer la classification finale une fois les cartes annuelles regroupées. Par exemple, le choix de l'opérateur logique "et" est en partie compenser par l'utilisation d'un seuil de faible amplitude. Toute cette question du choix de l'opérateur ne peut être étudiée de façon sérieuse à partir de seulement deux années de données d'autant plus qu'il existe d'autres choix que ceux présentés ici.

DISCUSSION

Une analyse statistique (Tukey's Honestly Significant Difference, Dowdy et Wearden, 1991) a été réalisée pour vérifier si les données d'une carte de rendement annuel regroupées suivant la classification donne des ensembles de points significativement différents les uns des autres. Sur une carte annuelle de rendement, tous les points appartenant à une catégorie SDT ont été regroupés et la moyenne du rendement a été calculée pour chaque groupe. Par la suite, les différences entre les moyennes ont été soumises au test statistique (Tableau 2). Pour chacune des années, les différences sont hautement significatives, ce qui indique que le choix d'utiliser au moins trois classes pour les rendements stables est justifié.

Tableau 2 : Différence entre les rendements moyens par classe

Différence [t/ha]	1996	1997	1998
Rendement typique - faible	**1,62**[†]	**1,78**	**0,69**
Rendement élevé - typique	**0,68**	**1,46**	**1,01**

[†]Les nombres en gras indiquent une différence significative, $P<0,01$.

Des diagrammes de dispersion montrant le rendement pour une année donnée à une position donnée dans la parcelle en fonction du rendement à la même position mais pour une autre année ont été préparés (exemple à la Fig. 5). Les points ont été regroupés en fonction de la classification de la série temporelle. Les points associés aux classes SDT sont groupés en nuages dont les centres s'alignent le long d'une droite de pente positive, ce qui indique que le rendement est positivement corrélé entre les deux années. Les points de la catégorie IDT ont tendances à se loger le long des interfaces entre les classes SDT et les nuages ainsi formés ont une orientation générale le long d'une droite de pente négative. Les nuages de points n'ont pas un contour net et ils se pénètrent les uns les autres. Cela est une indication a posteriori que l'approche par logique floue est indiquée.

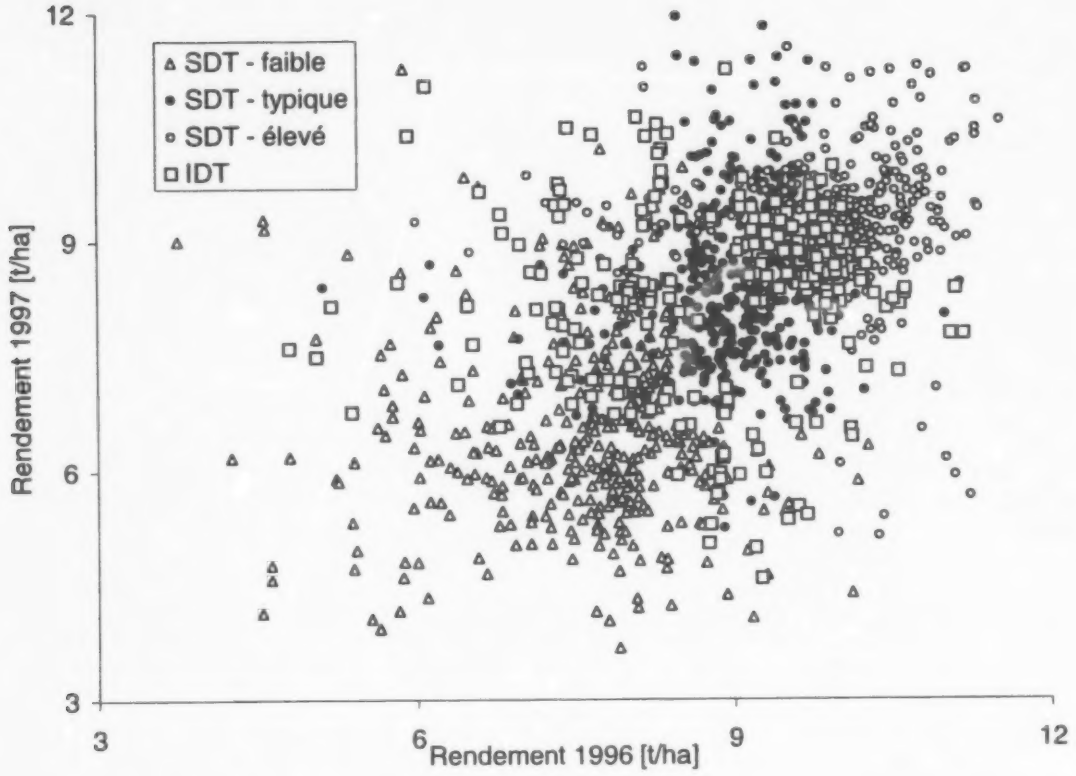


Figure 5 : Exemple d'un diagramme de dispersion.

Les résultats de la classification ont été utilisés par des agronomes comme outil d'analyse des cartes annuelles de rendement. En plus de cette information, les agronomes disposaient de 13 couches de données (classes de sol, différents éléments fertilisants, photographies aériennes, etc.). Les agronomes ont utilisé un système de pointage dans le but d'évaluer la valeur relative de toutes ces couches d'information dans un processus de diagnostic d'une carte de rendement pour une année particulière. Les cinq couches d'information qui se sont avérées les plus utiles sont la classification de la série pluriannuelle, une photographie aérienne des sols nus montrant les patrons de séchage, la carte des sols, la carte topographique et la carte de pH. La classification sur plusieurs années est considérée comme un outil de base pour le diagnostic car elle donne une clef pour segmenter la parcelle en unités plus homogènes, ce qui aide tout au cours du processus de diagnostic.

La méthode développée est une méthode de classification supervisée car le résultat de la classification doit se conformer à la définition des classes établie a priori. Cette approche diffère de celle de Lark et Stafford (1998) où la signification des classes doit être découverte a posteriori par des analyses subséquentes. La différence entre ces deux approches réside dans la question qui se pose à l'agronome une fois la classification terminée. Dans le cas de la méthode de Lark et

Stafford (1998), la question est : en quoi diffèrent les zones appartenant à des classes différentes ? Dans le cas de la méthode décrite ici, la question est : pourquoi le rendement dans une partie du champ est généralement faible, moyen, élevé ou variable ? Dans ce cas, l'agronome est tout de suite orienté vers des pistes diagnostiques qui sont propres à chaque catégorie.

RÉFÉRENCES

Blackmore S., Godwin R.J., Taylor J.C., Cosser N.D., Wood G.A., Earl R., Knight S. (1999). Understanding variability in four fields in the United Kingdom. *Proc. of the Fourth International Conference on Precision Agriculture 1998, Madison, WI, 19-22 July*: 3-18.

Broos B., Missotten B., Reybrouck S., De Baerdemaeker J. (1999) Mapping and interpretation of sugar beet yield differences. *Proc. of the Fourth International Conference on Precision Agriculture 1998, Madison, WI, 19-22 July*: 171-181.

Dowdy S., Wearden S. (1991). Statistics for Research - 2nd Edition. John Wiley&Sons, New York. 629 p.

Lark R.M., Stafford J.V. (1996). Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variability of crop yield. *Aspects of Applied Biology* 46:139-142.

Lark R.M., Stafford J.V. (1998). Information on within-field variability from sequence of yield maps: multivariate classification as a first step of interpretation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50:277-281.

Nolin M.C., Cambouris A.N., Simard R.R. (1997). La variabilité des sols: son origine et sa gestion. *Actes du Colloque Nouvelles technologies en agriculture, St-Jean-sur-Richelieu, Que., March 12, 1997*: 35-77.

Webster R., Oliver M.A. (1990). Statistical methods in soil land ressource survey. *Oxford University Press, New York.* 316p.

Zhang Q., Benson E. (2000). Fuzzy logic and its application in agriculture - Lecture notes. *University of Illinois at Urbana-Champaign.* 43p.

MACHINE-LEARNING ASSISTED KNOWLEDGE ACQUISITION FOR LACTATION CURVE ANALYSIS IN DAIRY FARMING

Diederik Pietersma[1], René Lacroix[1], Daniel Lefebvre[2] et Kevin M. Wade[1]

[1] Department of Animal Science, McGill University,
Ste-Anne-de-Bellevue, Québec H9X 3V9 < rene@infosys.agrenv.mcgill.ca >
[2] Programme d'analyse des troupeaux laitiers du Québec,
Ste-Anne de Bellevue, Québec H9X 3R4

ABSTRACT

The analysis of group-average lactation curves derived from milk-recording data has been identified as a valuable tool to support tactical-level dairy nutrition management. A knowledge-based system (KBS) that partially automates this process might be useful, providing dairy producers and their advisors with expert interpretation. However, traditional KBS development through interviews with domain specialist has proven to be time-consuming and costly. Alternatively, machine-learning techniques, such as decision-tree induction, may be able to learn automatically from example cases provided by a domain specialist. Thus, a research project was started to investigate the use of machine-learning assisted knowledge acquisition for the development of a KBS for group-average lactation curve analysis.

The overall problem area was split into three sub-problems: 1) removal of outlier lactations and tests, 2) interpretation of the resulting group-average lactation curves, and 3) diagnosis of detected abnormalities. Classification tasks were identified for each sub-problem. A case-acquisition and decision-support system was developed to transform the raw data into performance indices and graphical representations, and to facilitate the acquisition of example cases. A dairy nutrition specialist analyzed the milk-recording data of 33 Holstein dairy herds enrolled with the Québec dairy herd improvement agency (PATLQ) using the case-acquisition software, which resulted in a data set of example cases for each classification task. Potentially predictive attributes, such as the deviation of the group-average performance from benchmark data, were derived from the information available to the domain specialist. The performance of the induced decision trees on new, unseen, data was estimated through k-fold cross-validation and analyzed using receiver operating characteristic curves.

The induced decision trees were quite able to mimic the classifications as performed by a domain specialist. For example, a high sensitivity decision tree for the classification of peak milk production had an expected sensitivity of 91% at 88% specificity. The induced decision trees were easy to comprehend due to their relatively small size. This allowed for evaluation of the plausibility of the generated classifiers by the domain specialist and manual adjustment of decision nodes that were expected not to hold on new data. The decision trees were implemented as knowledge-based components in the final KBS. For each classification task, a series of three decision trees were implemented allowing end-users to choose the desired trade-off between sensitivity and specificity. Although the use of machine-learning techniques partially automates KBS development, the interaction between the system developer and the domain specialist remained very important. Given an adequate number of classified example cases, machine learning was found to be a feasible approach to support the development of KBS.

COMPLEX DECISION-MAKING FOR AUTONOMOUS AGRICULTURAL SYSTEMS

Robert Kok

Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University
Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9 < kok@macdonald.mcgill.ca >

ABSTRACT

More and more agricultural systems are making decisions highly autonomously. For example, greenhouse systems may act on weather forecasts, animal management systems may detect disease in individuals and take curative action, horticultural products may be automatically shipped by intelligent agents, mechanical robots may be involved in harvesting, etc. In many such cases, decisions must be made in highly complex environments and many interacting factors need to be considered. Often, rather than single decisions, sequences of decisions are needed in which individual decisions affect one another (e.g., in route planning for transportation). We have traditionally relied on humans to make decisions in complex environments, but it is becoming possible to create machines that can do this much more independently. Such machines must be intelligent to some degree, and can then have a fair degree of autonomy.

A machine that is to function independently in a complex environment must have the ability to analyze incoming data in a number of different ways, and to explore various possibilities for action. As part of such mentation activity. it is probably also useful if the machine is able to consider what impact its actions will have. Overall, the more thoroughly the system is able to reason about the situation, the higher the quality of its decisions will be and the less likely it will be to make outright mistakes. A multi-thread approach to decision making in which a number of processes operate in parallel and are able to mutually reinforce and weaken one another is likely to allow for the required flexibility, the speed, and the robustness.

There are two main aspects to consider in designing and constructing a multi-thread decision-making system: the knowledge held in the system and the mentation technologies utilized. These are often linked. Knowledge can be stored in a wide variety of forms such as simple data tables, more sophisticated data bases, case descriptions, rules, models, higher-level abstractions, etc. The knowledge itself may take the form of textual information in some symbolic language, images, artificial neural networks, procedural descriptions, statistical statements, etc. The mentation technologies that might be utilized range from straightforward look-up, to inferencing according to rules, to case-based reasoning, to simulation, to "intuitive-style" reasoning on the basis of highly interlinked data.

To achieve a high degree of system autonomy as well as sufficient operating speed and robustness, it is proposed that decision making systems that are to function in a complex environment be based on a multi-thread approach wherein the processes utilize a variety of mentation technologies and types of knowledge. This is the approach "followed" in nature that led to the creation of systems that have relatively low degrees of brittleness. The ideas will be illustrated with four examples: a) greenhouse climate control, b) in-herd animal disease detection, c) flower shipping path optimization and, d) robotic fruit picking.

DÉVELOPPEMENT D'UNE CHAMBRE PRESSURISÉE POUR L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES INSECTES

Bernard Goyette, Clément Vigneault et Guy Boivin

Centre de recherche et de développement en horticulture,
Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6, <vigneaultc@em.agr.ca>

RÉSUMÉ :

Il est généralement reconnu que les changements climatiques ont une influence marquée sur les organismes vivants. Plusieurs études ont déjà été réalisées pour démontrer les effets de la température sur une multitude d'animaux mais très peu de recherches ont été effectuées au sujet des effets de la pression barométrique sur le comportement des insectes faute d'équipement adéquat. Anderson et al. (1993) rapportent que les variations de pressions atmosphériques pouvaient ralentir ou stimuler certaines activités spécifiques des insectes comme l'alimentation ou les activités d'accouplement (cas de *Drosophila pseudoobscura;* Ankney, 1984).

La pression barométrique est le résultat de multiples facteurs météorologiques et physiques. Elle est généralement difficile à prédire et peut varier continuellement. L'étude du comportement d'insectes nécessite ainsi un système permettant de simuler et de contrôler en tout temps la pression à l'intérieur d'une enceinte close. Le but de ce projet était donc de concevoir et construire une chambre étanche répondant aux besoins de la recherche dans ce domaine. Ainsi, la chambre doit être ronde pour permettre un comportement normal de l'insecte; la température interne doit être très stable car une augmentation de température de 1°C augmente la pression interne de 2 mbar (Anderson et al. 1993); le contrôle par ordinateur de la pression interne de cette chambre doit permettre de mesurer et de faire varier à volonté la pression entre 950 et 1050 mbar.

Une chambre cylindrique de 20 cm de diamètre par 55 cm de hauteur a été entièrement construite en acrylique. Le système de mesure de la pression ainsi que le contrôle par ordinateur permet de faire varier la pression interne avec une précision de 6 1,1 mbar. Les effets des composantes du système ont été étudiés pour équilibrer et faire un compromis acceptable entre la précision du système et sa rapidité de réaction.

LA eLOGISTIQUE : MYTHE OU RÉALITÉ

Sophie D'Amours et Marie-Pierre Tremblay

Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR), Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4 < Sophie.Damours@centor.ulaval.ca >

INTRODUCTION

La nouvelle économie est caractérisée entre autres par l'évolution fulgurante des technologies de l'Internet (eTechnologie) couplée à des marchés de plus en plus difficiles à conquérir et une compétition globale. Dans ce contexte économique, l'impact des eTechnologies est non négligeable. Elles transforment l'environnement commercial des entreprises, bouleversent leurs fondements organisationnels et les poussent à redéfinir à la fois leurs stratégies et leurs processus.

Pourquoi est-ce ainsi? Probablement parce que l'Internet permet aux acheteurs d'exprimer plus clairement leurs besoins, de convoiter des vendeurs à travers la planète, d'obtenir des solutions en temps réel, d'explorer de nouvelles sources de fourniture et conséquemment être plus sélectifs. Bien que les critères prix, délai et qualité demeurent prédominants, les clients du 21ième siècle s'attendent à ce que leurs fournisseurs deviennent plus habiles en terme :

- de personnalisation des produits et des services,
- de service de résolution de problèmes opérationnels, fonctionnels et commerciaux en temps réel,
- de rapidité et de réactivité (agilité),
- de gestion des relations d'affaires,
- de sécurité et de fiabilité des transactions.

C'est dans le contexte de la nouvelle économie et de ses nouvelles exigences que les entreprises doivent aujourd'hui déployer de nouveaux modèles d'affaires.

Nous traiterons dans ce texte de l'évolution de la logistique grâce aux affaires électroniques et décrirons de nouveaux modèles d'affaires émergeants.

LA LOGISTIQUE

La nouvelle économie offre des opportunités incroyables aux entreprises qui arrivent à intégrer et à synchroniser habilement les flux de matières et d'information de leur « supply chain ». La supply chain ce définit comme étant le réseau des intervenants (sous-traitants, fournisseurs, producteurs, assembleurs, distributeurs et transporteurs) intervenant dans la réalisation d'un produit. Ce réseau repose toutefois sur un ensemble d'éléments plutôt complexes à maîtriser, comme :

- la gestion des relations;
- le partage de l'information;
- la gestion et la traçabilité des inventaires;
- la synchronisation des flux de matières et d'information;
- la gestion des capacités;
- la gestion de la demande;
- la gestion des personnes et de leurs compétences;
- la gestion de la qualité ...

Les études en logistique visent l'optimisation et l'intégration des flux d'information et de matière à travers l'ensemble des intervenants du réseau de création de valeur (*supply chain*). De nombreuses études démontrent que les logisticiens manipulent à travers leurs décisions des sommes considérables et qu'une optimisation globale des opérations de la *supply chain*, qui tient compte des intervenants en aval (fournisseurs) et en amont (clients) des opérations de l'entreprise, constitue un avantage concurrentiel important (Simchi-Levi et al., 1999, Tayur et al., 1999). Des entreprises comme IBM, Hewlett Packard, Dell et CISCO en témoignent quotidiennement. Des études menées en 1997 par le Supply Chain Council[1] ont établi que les entreprises de classe mondiale peuvent accroître leur revenu de plus de 6 % par rapport aux autres, par le biais d'une logistique efficace et intégrée à travers la supply chain.

Le Supply Chain Council a développé pour les entreprises un modèle opérationnel de la supply chain SCOR (Supply Chain Operation Reference Model). Ce modèle se base essentiellement sur quatre grands processus de l'entreprise : les achats, la production, la distribution et la planification. Il est illustré à la figure 1.

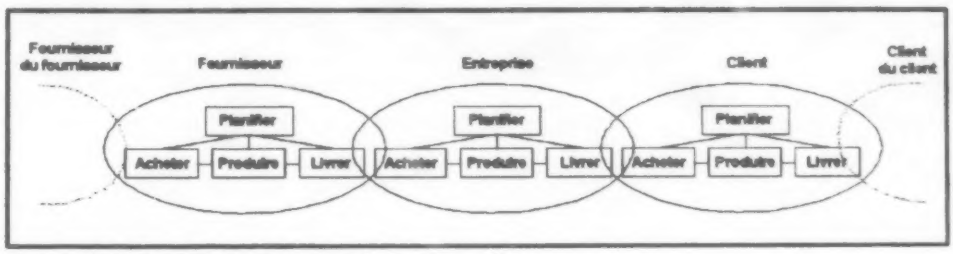


Figure 1. Modèle SCOR du Supply Chain Counsil.

De ce modèle deux dimensions sont à retenir. La première dimension consiste à bien saisir l'importance de maîtriser les processus internes de l'entreprise et de les intégrer les uns aux autres. Par exemple, lorsqu'une pièce est livrée par un fournisseur à l'usine, le responsable de la production doit en être informé tout comme les responsables de la qualité, des achats, des inventaires et des comptes à payer.

[1] Organisme à but non lucratif supporté entièrement par l'industrie manufacturière (www.supply-chain.org)

La deuxième dimension consiste à bien saisir l'importance des relations d'affaires qui prévaut avec les fournisseurs et les clients et de tenter d'intégrer les processus d'affaires entre entreprises.

La logistique traite les problèmes de gestion des flux de matières et d'information que ce soit au sein de l'entreprise, entre les différentes unités de l'entreprise ou encore entre l'entreprise et ses partenaires d'affaires (fournisseurs, sous-traitants et clients). La figure 2 illustre ces différents niveaux d'intégration.

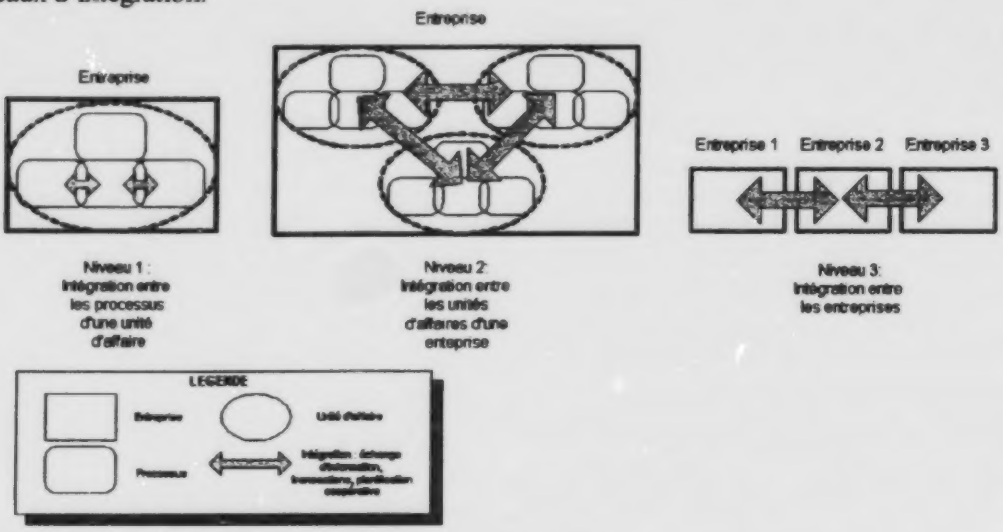


Figure 2. Trois niveaux d'intégration dans la Supply Chain.

Les problèmes de la logistique seront traités différemment dépendant du niveau où l'on se trouve. Ils varieront aussi passablement en fonction du type de système de production et des règles de fonctionnement établies entre les unités (cellules de travail, unités d'affaires et entreprises).

LES AFFAIRES ÉLECTRONIQUES

Jusqu'à tout récemment, l'engouement pour le commerce électronique a principalement touché les échanges d'entreprises à consommateurs (B2C). Aujourd'hui toutefois, le commerce électronique interentreprises (B2B) est de loin beaucoup plus important que le commerce d'entreprises à consommateurs. Selon *Dataquest*, la valeur des transactions entre entreprises s'est élevée à plus de 145 MM$ US en 1999 comparativement à 32 MM$ pour le commerce d'entreprises à consommateurs. Ceci n'est que la pointe de l'iceberg considérant les estimés du *Gartner Group* qui prévoit que la valeur des transactions électroniques interentreprises excèdera 7 billions de dollars US en 2004, soit 7 % de toutes les transactions mondiales.

Actuellement, les deux fonctions de l'entreprise les mieux supportées par les eTechnologies sont la gestion des approvisionnements (*eProcurement*) et la gestion des relations clients (*Customer Relationship Management, CRM*). Comme le montre les figures 1 et 2, il existe différentes applications technologiques qui permettent de faire des affaires électroniques. Leurs principales différences se situent dans le degré d'intégration des processus internes et externes de l'entreprise ainsi que dans le niveau de complexité des relations d'affaires. Dans la section qui suit, nous

porterons une attention particulière au mode de fonctionnement des portails verticaux et horizontaux.

Il existe deux types de marchés électroniques, les marchés horizontaux ou fonctionnels et les marchés verticaux. Les premiers offrent, à plusieurs industries différentes, leur expertise pour une fonction spécifique ou un processus d'affaires particulier. Par exemple **iMark.com** permet aux entreprises d'acheter ou de vendre des équipements usagés, tandis que **Celarix** offre un service complet de gestion de la logistique.

De leur côté, les marchés verticaux ont pour mission d'offrir à une industrie particulière un ensemble de services qui permettent à tous les membres de progresser par rapport aux industries concurrentes ou étrangères (Tocco, 2000). L'application maîtresse des portails verticaux reste toutefois l'achat et la vente de produits en ligne. De plus, ce type de marché électronique fournit les outils nécessaires pour faciliter le processus d'approvisionnement, comme des mécanismes pour supporter les transactions et des répertoires d'entreprises. Parmi la multitude de marchés verticaux disponibles sur Internet on retrouve entre autres **Altranet** (énergie), **Band-X.com** (télécommunications), **e-Steel** (métal), **PaperExchange** (papier) et **Chemex** (chimique).

Les marchés électroniques sont soit biaisés, soit neutres. Un marché est considéré comme étant neutre lorsqu'il est opéré par une tierce personne indépendante et ne favorise ni les acheteurs, ni les vendeurs. Les marchés biaisés privilégient une des deux parties impliquées dans une transaction. En général, les marchés électroniques qui sont orientés vers les acheteurs offrent les avantages suivants : diminution des coûts et du temps de recherche d'un produit, accès à un grand nombre de fournisseurs potentiels, baisse des prix grâce à des regroupements d'acheteurs, création de marchés secondaires pour les surplus d'inventaire et diminution des coûts de transaction (Ederer, 2000).

Les deux méthodes qui sont généralement utilisées pour effectuer les transactions sur les marchés électroniques sont l'agrégation et le couplage de l'offre et de la demande (*matching*). L'agrégation consiste à rassembler l'information sur les produits offerts par différents fournisseurs au sein d'un seul catalogue. L'acheteur peut alors consulter en direct et à un seul endroit une multitude d'offres et ainsi faire un choix éclairé. L'agrégation est très efficace lorsque l'industrie est très fragmentée, lorsque les produits recherchés sont spécialisés et lorsque les coûts du processus d'approvisionnement sont élevés par rapport à la valeur des items achetés (Ederer, 2000). Le principe du couplage consiste à rassembler les acheteurs et les fournisseurs afin qu'ils puissent négocier en ligne le prix et d'autres critères relatifs à l'achat d'un produit ou d'un service. Cette méthode tend à donner de meilleurs résultats lorsque les prix et la demande sont instables, les volumes d'affaires sont élevés et les produits sont standards.

La méthode privilégiée pour effectuer les transactions va aussi influencer la façon dont les prix seront établis. En effet, dans le cas des catalogues, les prix sont fixés (*fixed pricing*) par chacun des fournisseurs participants. Ce mécanisme est efficace lorsque, pour une industrie donnée, les achats, la demande et la compétition sont relativement statiques. Différents modèles de « prix dynamiques » (*dynamic pricing*) sont possibles, les principaux sont décrits au tableau 1. Ils permettent aux acheteurs et aux fournisseurs de trouver les meilleurs prix sur le marché et forcent les deux parties à s'impliquer activement dans le processus de détermination des prix de vente.

Pendant que les modèles d'affaires fondamentaux demeurent variés, les concepts de marché électronique (*market place*) ou de communauté d'affaires (*Virtual Value Net*[2]) prennent de plus en plus de place sur Internet. Par définition, un marché électronique est un lieu sur Internet où les acheteurs et les vendeurs se rassemblent de façon virtuelle pour faire du commerce de biens et de services ainsi que pour échanger de l'information. L'apparition de ces marchés répond à un nouveau besoin, celui de repenser l'intermédiation entre les fournisseurs de produits et de services et leurs acheteurs en vue d'optimiser la chaîne de valeur qui s'étend des matières premières jusqu'aux produits finis.

Tableau 1 [3] : Modèles de « prix dynamiques ».

Modèle	Nombre acheteurs	Nombre vendeurs	Mécanisme
Enchères	Plusieurs	Un	La transaction va à l'acheteur ayant fait l'offre la plus élevée.
Enchères inversées	Un	Plusieurs	La transaction va au vendeur ayant fait l'offre la plus basse.
Échange (soumission)	Plusieurs	Plusieurs	Les acheteurs et les vendeurs font des offres pour acheter et vendre sur un marché électronique.
Achats groupés	Plusieurs	Un	Le vendeur fixe le prix initial et des escomptes sont consentis en fonction du nombre d'acheteurs potentiels.
Dites votre prix (*Name your price*)	Un	Plusieurs	Les acheteurs affichent leur prix; le premier vendeur qui accepte ce prix obtient la transaction.
Négociation	Un	Un	Les acheteurs et les vendeurs participent à l'établissement des prix en marchandant.

Par définition, une communauté d'affaires offre un éventail de fonctionnalités plus large que les marchés électroniques, qui vont au-delà de la transaction d'affaires et qui permettent aux entreprises d'évoluer efficacement en réseau. Le traitement et l'analyse d'information pertinente ou encore la veille technologique sont des services que les communautés d'affaires peuvent offrir.

Les marchés électroniques et les communautés d'affaires vont combiner de manière différente les caractéristiques précédentes en fonction de la dynamique des industries qu'ils desservent. Ils vont aussi se distinguer par les services supplémentaires offerts (expertise, service de nouvelles, forums, etc.) ainsi que par les moyens utilisés pour générer leurs revenus.

La figure qui suit est reprise de Audet, M. et Lépinay, S. (2000). Elle illustre différentes utilisations des eTechnologies en fonction de la complexité des relations d'affaires supportées et du niveau d'intégration visé.

[2] Le concept de « value net » a été présenté pour la première fois par Brandenburger et Nalebuff dans leur ouvrage intitulé : co-opetition. Clients et fournisseurs peuvent interagir de façon coopérative sur les réseaux de valeur virtuels. Ils peuvent en travaillant de pairs accroître respectivement leur performance.

[3] Tirée de : Ederer, J., *E-Merging Markets : An Overview of B2B E-Commerce Markets and Services*, 2000.

Figure 3 [4] : Typologie des modèles d'affaires électroniques.

DE NOUVEAUX MODÈLES D'AFFAIRES

Bien que les marchés électroniques et les communautés d'affaires offrent de nouvelles opportunités d'affaires aux entreprises, ils sont généralement déconnectés des opérations courantes de l'entreprise comme la planification de la production et la gestion des inventaires. Depuis 1994, les affaires sur Internet sont autorisées. La petite histoire de ce nouveau monde des affaires nous a fait rapidement réaliser les difficultés de la vente et de l'achat en ligne. Entre autres, le manque d'intégration entre les sites de vente et les opérations de l'entreprise a créé des attentes que les entreprises n'ont pu respecter.

Ceci constitue un des défis les plus importants des prochaines années, soit celui d'intégrer les activités de vente et d'achat en ligne à l'ensemble des fonctions de l'entreprise.

Un autre phénomène intéressant que nous avons appris de la vente en ligne, est certainement le potentiel de gérer plus efficacement la demande et les relations avec les clients et les

[4] Tirée de : Audet, M. et Lépinay, S., *2B or not 2B : parce que désormais les affaires électroniques seront vos affaires*, Réseau CEFRIO, Vol.2, No.2, 8pp., juin 2000.

fournisseurs. Cette relation virtuelle et plus intime avec les clients et les fournisseurs vient hanter de nouveau le paradigme d'un marché dur et spontané (*spot market*).

Aujourd'hui, nos connaissances du potentiel des technologies de l'Internet sont encore bien limitées. Les technologies du datamining, des transactions en ligne et du transfert d'information valorisée en ligne sont maîtrisées. Quelques applications d'aides à la décision de gestion de matière et d'information logistique sont actuellement disponibles à travers des systèmes d'approvisionnement électronique et de gestion des relations clients. Mais tout ou presque, reste encore à faire en terme de planification coopérative des activités créatrices de valeur par le biais de communautés d'affaires publiques ou privées. La figure 4 propose un cadre de développement de la eLogistique.

Le groupe Forrester (http://www.forrester.com) estime qu'en 2001, plus de 70% des entreprises manufacturières partageront des informations concernant les demandes, les inventaires et les statuts des commandes. Elles auront alors atteint le deuxième niveau dans l'échelle de l'intégration de la *supply chain*. Les niveaux 4 et 5 sont ceux qui offriront le plus de valeur ajoutée à la *supply chain*. Ils sont associés au concept de la planification coopérative. La planification coopérative vise la synchronisation des plans de production et des flux de produits, l'optimisation de l'utilisation des ressources, la réduction des inventaires et l'accroissement de la capacité le tout dans le but de répondre promptement aux exigences clients.
L'importance de la collaboration entre entreprises pour la réalisation de produits est maintenant évidente. Les nouvelles approches, développées principalement par l'industrie, comme le CPFR, VMI, ESI, QR, JIT II, ainsi que les mouvements industriels de standardisation des échanges (VICS, RosettaNet,...) en sont des preuves concrètes.

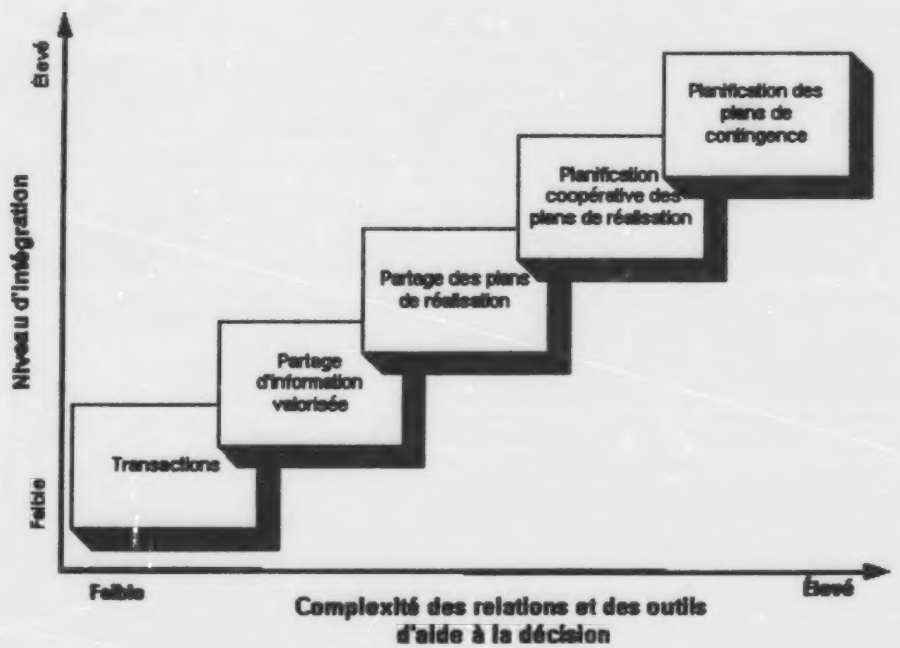


Figure 4. Un cadre de développement de la eLogistique.

CONCLUSION

Jusqu'à tout récemment, le pilotage de la *supply chain* n'était pas réalisé de façon globale ni intégrée. Chaque entreprise, parfois chaque département, (approvisionnement, production, distribution, service à la clientèle, maintenance, etc.), optimisait ses propres opérations en espérant que l'ensemble de la *supply chain* en sorte performante. Au cours des quinze dernières années, elles se sont lancées dans le développement global de leurs opérations et l'établissement de réseaux efficaces et profitables. Aujourd'hui, avec la venue des eTechnologies, les entreprises envisagent mieux gérer leurs relations à travers leurs *supply chains*.

Ces technologies permettent d'imaginer des solutions d'affaires encore inexprimées, partant de la transaction en ligne, à l'échange d'information valorisée, à l'échange de plans et finalement, à l'établissement conjoint de plans. Ces solutions devront servir à mieux gérer la demande, les inventaires, les actifs ainsi qu'à mieux satisfaire les clients des usagers.

Les technologies de l'Internet peuvent améliorer considérablement la performance des entreprises en assurant par exemple une meilleure intégration des flux d'informations essentiels à la synchronisation des flux de matières. Elles soulèvent toutefois des défis considérables, comme celui de minimiser les temps de réponse afin de satisfaire les attentes des internaudes professionnels ou encore, celui d'archiver, d'analyser et de fournir la bonne information en tout temps.

BIBLIOGRAPHIE

Simchi-Levi D., Kaminsky P. et Simchi-Levi E. (1999), *Designing and Managing the Supply Chain : Concepts, Strategies, and Cases*, Irwin/McGraw-Hill, 321 pages.

Tayur S., Ganeshan R. et Magazine M.(editor) (1999) Quantitative models for supply chain management, Kluwer Academic Publishers, printed in the USA.

Audet, M. et Lépinay, S., (2000), *2B or not 2B : parce que désormais les affaires électroniques seront vos affaires*, Réseau CEFRIO, Vol.2, No.2, 8pp., 2000.

Ederer, J., (2000), *E-Merging Markets : An Overview of B2B E-Commerce Markets and Services.*

Brandenburger A. M. et Nalebuff B.J. (1996), *Co-opetition*, Doubleday, 265 p..

Tocco, G. (2000), *À chaque industrie son portail : Les portails verticaux la nouvelle manne du commerce électronique*, Les Affaires, Cahier spécial, samedi 8 avril.

SITES CONSULTÉS

http://forrester.com/
http://gartner12.gartnerweb.com/dq/static/dq.html
http://gartner5.gartnerweb.com/public/static/home/ggebiz.html
http://www.supply-chain.org

NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS DANS LA MODÉLISATION ET L'OPTIMISATION DES PROCÉDÉS

Jules Thibault

Département de génie chimique, Université d'Ottawa,
Ottawa, Ontario, K1N 6N5 < thibault@genie.uottowa.ca >

RÉSUMÉ :

L'ère de la révolution informatique a permis la résolution de plusieurs problèmes qui ne pouvaient être solutionnés auparavant faute de capacités de calcul des ordinateurs. L'augmentation de la puissance de calcul informatique a aussi conduit au développement rapide de nouvelles méthodes pour la modélisation, le contrôle et l'optimisation des procédés. Toutefois, il y a une inertie inhérente à l'implantation industrielle de ces techniques car elles sont un peu rébarbatives au point de départ bien qu'elles soient en réalité d'une très grande simplicité. Il suffit de dépasser le stade initial de la peur des mathématiques qui les accompagnent pour s'en convaincre.

L'industrie alimentaire pourrait grandement bénéficier de ces nouvelles techniques. En modélisation, l'utilisation conjointe des réseaux de neurones et d'un modèle phénoménologique pour construire un modèle hybride semble être une voie intéressante pour modéliser des problèmes complexes. Un modèle hybride permet d'utiliser toutes les connaissances que possède l'usager de son procédé et de combler le manque de connaissance en utilisant un modèle empirique très versatile comme les réseaux de neurones. À mesure que le niveau de connaissances augmente, une plus grande partie est intégrée dans la partie phénoménologique du modèle hybride ce qui permet de développer rapidement un modèle et de le modifier progressivement d'un modèle purement empirique à un modèle ayant de plus en plus de connaissances exprimées sous forme d'équations que l'ingénieur et le scientiste peuvent plus facilement comprendre et apprécier.

Un autre sujet d'avenir pour l'industrie alimentaire est l'utilisation des techniques de réconciliation des données pour digérer et harmoniser toute l'information recueillie dans les procédés modernes. Par exemple, dans une usine de fabrication du fromage, il y a un très grand nombre de variables qui sont mesurées en ligne et/ou sont entrées manuellement dans l'ordinateur. Ces données sont utilisées pour prendre des décisions critiques pour le contrôle de la production. Par ailleurs, ces données sont entachées d'erreurs (erreurs de lecture, mauvais fonctionnement des capteurs, etc.). Il est possible d'améliorer la qualité de ces mesures et de diminuer la variance des valeurs utilisées dans le contrôle des procédés en réconciliant l'ensemble des valeurs des variables du procédé. La technique de réconciliation des données fait appel à la fois aux mesures elles-mêmes et à des modèles qui les relient tels des bilans de matière et d'énergie. On cherche à boucler les bilans tout en ne s'éloignant pas trop des valeurs mesurées. Par une pondération appropriée des modèles et des valeurs mesurées, une fonction objective est définie et optimisée, ce qui nous permet de trouver de nouvelles valeurs des variables. La pondération attribuée aux modèles et aux valeurs mesurées dépend de la confiance que nous avons en ces modèles et en ces mesures. Normalement, la pondération pour les mesures est donnée par l'inverse de leurs variances respectives. Ces nouvelles valeurs permettent d'évaluer plus

objectivement les performances du procédé et offrent un meilleur suivi. Elles peuvent aussi permettre de déceler le mauvais fonctionnement de certains capteurs.

Un dernier thème est l'optimisation des procédés. Ce thème est particulièrement important car il a un impact très significatif sur le rendement des procédés. Dans la majorité des procédés industriels, nous sommes confrontés à des problèmes d'optimisation comportant plusieurs objectifs qui sont presque invariablement contradictoires. Par exemple, on cherchera à diminuer les coûts de production, à augmenter la qualité du produit, à obtenir la bonne texture et couleur du produit, etc. Il est fort probable qu'une diminution des coûts entraîne une détérioration d'autres propriétés qui auraient un impact sur la vente du produit. Il est donc nécessaire de considérer simultanément toutes les variables du procédé, ce qui n'est pas une mince tâche pour l'ingénieur de procédé. Heureusement, de nouvelles techniques d'optimisation ont vu le jour dans les dernières années et ont ainsi grandement simplifié la prise de décisions dans le cas de problèmes complexes. Parmi ces nouvelles techniques, on distingue la méthode des bilans de flux et la méthode des ensembles flous.

Il existe une panoplie d'autres méthodes qui viendraient aussi faciliter la tâche des ingénieurs de procédés industriels mais qui demeurent trop souvent dans des thèses et des articles scientifiques. Nous devons collectivement, universités et industries, faire un plus grand effort et montrer une plus grande ouverture et collaboration pour que ces méthodes soient implantées dans la réalité.

21 mars 2001
13h25 à 15h00

Thème 4 : Gestion et traitement des lisiers

Modérateur : D. Lemelin

LES SURPLUS DE DÉJECTIONS ANIMALES AU QUÉBEC : PROBLÉMATIQUE ENVIRONNEMENTALE, ÉLÉMENTS DE

Pierre Vallée, Carol Émond et Jacques Roy

Ministère de l'Environnement du Québec, Direction des politiques du secteur agricole, Québec, Québec, G1R 5V7, <pierre.vallee@menv.qc.ca>, <carol.emond@menv.qc.ca>, <jacques.roy@menv.qc.ca>

RÉSUMÉ :

À l'échelle du Québec, des efforts importants ont été déployés par différents intervenants pour atténuer les impacts sur l'environnement eau, air et sol générés par des activités municipales, industrielles ou agricoles. Jusqu'à maintenant, plusieurs milliards de dollars y ont été investis.

Malgré ces efforts, beaucoup reste encore à faire particulièrement dans le secteur agricole. Parmi les différentes causes de pollution associées aux activités agricoles, celle de la surfertilisation que l'on retrouve dans plusieurs régions du Québec vient très haut en tête de liste.

Sur le plan technique quelle est l'ampleur de cette problématique agroenvironnementale à l'échelle du Québec, régionale, municipale ou encore selon une délimitation de bassins versants ? Quels sont les gestes à poser pour en minimiser les impacts sur l'environnement ? Quelles sont les responsabilités des différents intervenants impliqués ou préoccupés par cette problématique ? Y a t-il des solutions techniques et ou économiques permettant de bien maîtriser cette problématique ?

Voilà quelques questionnements qui seront abordés lors de la présentation.

LE TRAITEMENT DU LISIER DE PORC À LA FERME AVEC LA SOLUTION BIOFERTILE

Camil Dutil, Gilles Gagné et Steven Blaney

Envirogain Inc., 1112 boul. de la Rive Sud, St-Romuald, Québec, G6W 5M6
< camil.dutil@envirogain.com >

LA PROBLÉMATIQUE AU QUÉBEC

Le traitement des lisiers et fumiers lié à une valorisation économique viable apparaît aujourd'hui comme incontournable et possible. Il est incontournable puisque le marché mondial de la consommation de viandes, particulièrement le porc et les volailles, est en pleine croissance et que le principal enjeu pour assurer cette croissance est que celle-ci se réalise en harmonie avec les multiples contraintes dont celles associées aux lisiers produits. Malgré la crise économique asiatique récente, une croissance de 11% du nombre de porcs abattus a été enregistrée au Québec en 1998 par rapport à 1997. Au dernier sommet socio-économique sur l'agriculture, une croissance minimum de 15% a été visée d'ici 2004. Face à cette demande, les producteurs optimisent leurs structures de production afin de répondre à celle-ci et également à la concurrence.

Cependant, la spécialisation de ces productions animales et leurs concentrations sur des territoires limités entraînent des excédents d'effluents organiques par rapport à la capacité du milieu (sols et plantes) à les recycler. Cette situation cause des dégradations de ressources naturelles (eaux de consommation et sols arables) et engendre des conflits sociaux majeurs (utilisation et jouissance de l'eau et odeurs désagréables). Face à ce dilemme et depuis plus de dix ans, des innovations techniques importantes en traitement de ces effluents ont donc eu lieu pour pouvoir maintenir en place et continuer de développer la production porcine. Cependant, les nouvelles techniques n'offrent pas de solutions intégrées et complètes pour solutionner globalement la problématique puisqu'elles ne considèrent pas l'ensemble de celle-ci et l'importance stratégique d'intégrer les biosolides générés par les traitements en tant que facteur économique déterminant de réussite.

Il existe plusieurs moyens pour traiter le lisier à la ferme : aérobie, anaérobie, physico-chimique, filtration membranaire, etc. Pour les situations de nouvelles fermes ou de ferme en exédents de phosphore et d'azote, le traitement aérobie des lisiers combiné avec des techniques de séparation de phase et de polissage est la solution la plus répandue dans le monde (Porc Magazine Juillet-août 2000, Comité national CETAC-West 2000). Elle est aussi la solution la plus avantageuse pour atteindre simultanément les objectifs de réduction des volumes et d'exportation rentable des excédents d'azote et de phosphore. En effet, ce type de traitement permet d'une part de réduire la charge organique et minérale (DBO_5, MES, P et N) de la partie liquide en vue d'irriguer sur de faibles surfaces de terre ou encore d'un rejet au cours d'eau lorsque l'on traite encore plus avec du polissage grâce à des technologies physico-chimiques. D'autre part, cette solution permet de produire un biosolide pelletable qui peut être exporté sur de longues distances à des centres de

compost ou de fabrication d'engrais. Le traitement anaérobie ne permet pas le traitement des liquides en vue de réduire les volumes à moins qu'il soit combiné à des technologies de traitement aérobie ou des techniques de filtration par membranes. Ce type de traitement à la ferme est surtout avantageux pour les zones agricoles où il existe de grandes surfaces en cultures à proximité et pour des receveurs qui veulent un lisier désodorisé et riche en azote ammoniacal. Toutefois, en centre régional ou pour des unités de 150 mètres cubes par jour, ce type de traitement combiné avec d'autres techniques peut être très avantageux en raison de la récupération d'énergie grâce à la récupération du méthane. Pour leur part, les techniques de traitement partiel avec des additifs chimiques ou de séparation de phase sont généralement avantageuses que pour des cas précis n'ayant qu'un problème partiel à solutionner. Par exemple, un producteur de porc qui possède, en vertu de la nouvelle réglementation, 80 % de ses terres pourrait faire simplement une séparation de phase gravitaire dans la fosse en vue d'utiliser toute l'azote sur ces terres et d'exporter le phosphore dans un centre régional. En zone de surplus telle que la région de Chaudière Appalaches, ce type de producteur est de plus en plus rare et c'est pourquoi le traitement complet des lisiers est devenu incontournable.

La solution BIOFERTILE décrite dans la prochaine section s'inscrit dans cette optique.

LA SOLUTION BIOFERTILE

La solution BIOFERTILE développée par l'équipe d'ENVIROGAIN est un système de traitement complet et intégré du lisier de porc à la ferme. Il s'agit d'une solution à la ferme permettant de concentrer la valeur fertilisante du lisier dans un solide pelletable à haute valeur ajoutée et sans odeur et de produire un effluent liquide faiblement chargé pour irrigation sur des terres ou un rejet au cours d'eau.

La solution BIOFERTILE intègre ainsi un ensemble de technologies pour le traitement complet du lisier de porc à la ferme, dont :

- **FILTROPRESSE** : Une technologie de déshydratation mécanique et physique du lisier brut et des boues biologiques provenant des diverses étapes de la filière de traitement du lisier ;

- **BIORÉACTEUR** : Un bioréacteur biologique aérobie permettant une réduction substantielle de la charge organique ;

- **POLIPUR** : Une technologie physico-chimique de polissage en vue de répondre aux différentes normes demandées pour un rejet au cours d'eau.

La solution BIOFERTILE est donc adaptée tant pour les élevages existants que pour les nouveaux bâtiments. Le système génère une boue riche en éléments fertilisants et en matière organique. Cet avantage permet d'envisager la valorisation des boues avec de nouveaux receveurs, comme par exemple les producteurs maraîchers ou encore l'exportation hors du Québec de boues séchées et granulées dans le marché des engrais organiques ou en complément des engrais minéraux. Ces alternatives seront rentables en raison de la qualité des biosolides obtenus par un procédé biologique aérobie maximisant la conservation de l'azote et de la matière organique.

Le développement d'une solution à la ferme passe nécessairement par l'identification de débouchés rentables pour les boues issus du procédé. L'implantation en Chaudière Appalaches du centre Agrior par FertiOr et Envirogain, un centre régional de transformation et de valorisation des surplus de fumiers et lisiers de la région de Beauce Nord, constitue une autre opportunité pour la mise en place de plusieurs solutions technologiques du type BIOFERTILE. Ce centre permettra de recevoir les boues issues de BIOFERTILE ainsi que d'autres technologies de traitement à la ferme et de les acheminer vers des marchés internes et externes non actuellement preneurs de fumiers et lisiers.

Une unité de validation scientifique et de démonstration technologique est en opération au Centre d'excellence en production porcine (CEPP) de Saint-Anselme depuis février 2001. Celle-ci permettra de démontrer aux éleveurs de porc les avantages suivants :

- une élimination complète de la quantité de lisier brut à entreposer, transporter et à épandre;
- l'obtention d'une boue pelletable permettant d'exporter la quasi-totalité de l'azote et du phosphore;
- l'irrigation ou le rejet au cours après polissage d'un effluent faiblement chargé;
- une élimination de problèmes d'exploitation par un système d'instrumentation et de contrôle performant permettant d'opérer dans des conditions automatisées et contrôlées;
- l'opération d'un procédé en continu capable de s'adapter aux fortes charges organiques et aux variations temporelles de la charge des effluents à traiter (DBO, DCO, MES, N, P, etc.);
- une valeur agronomique élevée de la boue ;
- un potentiel de marché pour les boues vers des marchés non traditionnels ;
- la possibilité de réduire les odeurs de toute la chaîne de gestion à des coûts compétitifs en utilisant une technique de stabilisation des boues ;
- un rejet au cours d'eau de l'effluent épuré conforme aux normes du MENV (avec POLIPUR).

Les coûts de traitement complet avec la solution Biofertile sont nettement plus avantageux que l'achat de terre comme le témoigne le tableau de la page suivante. Le tableau démontre que les coûts de transport imputables à un traitement partiel rendent cette avenue moins avantageuse qu'un traitement complet. La gestion des boues sous une forme pelletable réduit aussi considérablement les coûts de transport, ce qui la rend d'autant plus avantageuse. Dans ce tableau, aucun revenu n'a été considéré pour le solide pelletable obtenu du traitement biologique Biofertile mais dans quelques mois l'équipe de R-D de Envirogain pourrait réserver des surprises en annonçant un revenu pour le producteur pour le solide.

Tableau 1. Coût de traitement du lisier de porc par m3 de lisier brut pour les municipalités en surplus.

Type de traitement	Coût du traitement ou achat de terre	Transport sur 10-15 km	Coût / revenu pour disposer la boue	TOTAL	Rapport coût/efficacité	
					Azote	Phos.
Traitement partiel (séparation de phase avec additifs) *Exportation du phosphore sans réduction de volume*	2,00 à 4,00$	4,00 à 6,00$	2,00	8,00 à 12,00$	Faible	Moyen à bon
Achat de terre Chaudière Appalaches	5,00 à 8,00$	4,00 à 6,00$	0	9,00 à 14,00 $	bon	bon
Traitement complet Solution Biofertile (25 à 12 mètres/jour) *Réduction de 80% des volumes avec boue pelletable*	6,50 à 9,00 $	0,50	0	7,00 à 9,50 $	Très bon	Très bon

Note : tous les coûts sont ramenés en mètres cubes de lisier brut, ce qui explique les faibles coûts de transport des boues solides. Pour Biofertile, les économies reliées à l'élimination de la fosse ne sont pas incluses. Si on inclut ces coûts, soit de l'ordre de 2 $ par mètre cube, on obtient un coût total de **5,00 à 7,50 $** par mètre cube de lisier brut.

CONCLUSION

Le traitement et la valorisation du lisier de porc s'avère incontournable pour maintenir et soutenir la croissance de la filière porcine en harmonie avec le milieu. Avec le resserrement progressif des normes environnementales et la concentration de la production dans des régions spécifiques, des surplus de lisier considérables seront générés. À grande échelle, la seule avenue économique et environnementale s'avère être l'exportation des biosolides. Pour ce faire, le traitement à la ferme doit viser, selon nous, à maximiser la conservation de la valeur fertilisante du lisier. Il doit aussi être couplé avec une vision régionale permettant de transformer avantageusement ces biosolides à valeur ajoutée.

TRAITEMENT DU LISIER DE PORC PAR LE PROCÉDÉ DE BIOFILTRATION SUR SUPPORT ORGANIQUE BIOSOR^{MD}-LISIER CAS DE LA VITRINE TECHNOLOGIQUE DE LA PORCHERIE PURPORC S.E.N.C.

N. Turgeon, G. Buelna et Y. Bernard

Direction Environnement, Centre de recherche industrielle du Québec
Ste-Foy, Québec, G1P 4C7 < Nturgeon@criq.qc.ca >

RÉSUMÉ :

Des travaux visant à démontrer à grande échelle l'efficacité du procédé de biofiltration sur support organique BIOSOR^{MD}-Lisier pour la désodorisation, le traitement et la valorisation du lisier de porc et de l'air vicié des bâtiments de production ont été réalisés à la porcherie PURPORC S.E.N.C. de Saint-Valérien. Un système de traitement BIOSOR^{MD}-Lisier a été implanté au cours de l'automne-hiver 1998-1999 sur ce complexe porcin du type naisseur comprenant une maternité de 1 200 truies ainsi qu'une pouponnière de 3 500 porcelets/emplacement. Les ouvrages et les équipements mis en place ont été conçus pour traiter la totalité du volume des déjections produites (environ 27 m^3/j de lisier) ainsi qu'une partie de l'air vicié provenant des bâtiments d'élevage (jusqu'à 22 000 m^3/h).

Après deux (2) années d'opération, les résultats observés démontrent la robustesse et la performance du procédé BIOSOR^{MD}-Lisier. En effet, le système a bien performé malgré les fortes variations de charge polluante et de température en entrée des unités de traitement. Le procédé BIOSOR^{MD}-Lisier de la porcherie PURPORC S.E.N.C a atteint des performances d'épuration pour la fraction liquide du lisier brut de l'ordre de 99,8 % pour la DBO_5, 99,9 % pour les MeS, 95,8 % pour l'azote total NTK et 81,4 % pour le phosphore total P_{tot}. L'efficacité du système a permis de rejeter la fraction liquide du lisier traité représentant environ 70 % du volume du lisier au milieu naturel par le biais d'un champ d'épuration. Le traitement par biofiltration des émissions gazeuses provenant des bâtiments de production a globalement permis une réduction d'environ 90 % de l'intensité d'odeur associée à une efficacité d'enlèvement de l'ammoniac (NH_3) et de l'hydrogène sulfuré (H_2S) variant entre 80 % et 100 %.

Les boues décantées sont caractérisées par une teneur en eau moyenne (TEE) d'environ 91 %, une teneur en azote total (NTK) de 3,30 kg/tonne b.h. et en phosphore total (P_{total}) de 1,9 kg/tonne. Il a été établi que, par rapport au lisier brut, on retrouve dans les boues décantées environ 70 % du phosphore, 30 % de l'azote et 30 % du volume. Les boues de même que les supports organiques utilisés comme milieu filtrant à l'intérieur des biofiltres constituent des amendements organiques riches en éléments fertilisants qui peuvent être valorisés tels quels ou bien transformés sous forme de composts qui rencontrent le critère AA de la norme CAN/BNQ 0413-200.

Les résultats obtenus jusqu'à présent montrent que le procédé de biofiltration sur lit organique BIOSOR^{MD}-Lisier constitue une alternative simple et performante pour le traitement et la valorisation de lisier de porc. La poursuite des travaux de suivi et d'optimisation permettra de confirmer à plus long terme ces résultats.

PRÉSENTATION DE NOTRE SYSTÈME DE FRAGMENTATION DU LISIER DE PORCS PAR UN PROCÉDÉ 100 % MÉCANIQUE

J. Réal Lasnier

Purin Pur Inc., 1418-A, rue Sud
Cowansville, Québec, J2K 2Y8 < purin-pur@qc.aira.com >

RÉSUMÉ :

Purin Pur est un système 100 % mécanique et permet de produire à partir du lisier de porc trois résidus organiques ainsi qu'une eau pouvant être rejetée de façon sécuritaire à l'environnement. Notre système est simple et traite directement à la ferme le lisier de l'exploitation. Il s'adapte à des installations déjà existantes ou peut être incorporé lors de l'aménagement de nouveaux bâtiments. Il fonctionne de façon autonome avec un minimum d'entretien. Le procédé est simple et s'opère en quatre étapes.

QUATRE ÉTAPES DISTINCTES CONSTITUENT NOTRE OPÉRATION

1ère phase : Séparation
Un tamis tangentiel et une presse à vis font office de séparateur. Grâce à cette étape, nous parvenons à extraire environ 3 % de solide du lisier brut initial. Ce solide peut être composté et utilisé comme amendement organique. Le liquide encore très chargé de matière en suspension est ensuite dirigé vers la filtration membranaire.

2ième phase : Ultrafiltration
Le liquide provenant de la séparation passe par une série de quatre membranes. Le liquide extrait à cette étape est fortement chargé de phosphore. Il peut être pompé et se prête bien à l'épandage. Ce liquide peut également être acheminé vers une usine de traitement régionale.

3ième phase : Osmose inverse
Par la suite, le liquide restant est dirigé vers l'unité d'osmose inverse afin de le purifier de ses sels minéraux, microbes, virus, bactéries et impuretés restantes. Cette phase est constituée de quatre membranes enfermées dans des cylindres en acier inoxydable résistants. Le concentré résultant de cette filtration est chargé d'azote. C'est dans ce concentré que l'on retrouve l'azote contenu dans le lisier brut. Ce liquide peut être utilisé en combinaison avec les résidus de l'ultrafiltration pour fin d'épandage comme il peut être acheminé vers une usine régionale.

4ième phase : Polissage
Le liquide est acheminé vers une deuxième unité d'osmose inverse pour le purifier en une eau d'excellente qualité représentant entre 60 et 70 % du volume initial du lisier. Cette eau peut être conservée dans un réservoir et servir au lavage des bâtiments ou encore être rejetée à la nature.

Tableau 1. Pourcentage de résidus à chaque étape du procédé.

Étape du procédé	% de résidus
Séparation	3 %
Ultrafiltration	18 %
Osmose I	19 %
Osmose II	60 %

AUTOMATION

Ce procédé de fragmentation est entièrement automatisé et ne requiert aucune main-d'œuvre pour son fonctionnement. De la préfosse, le lisier est pompé vers le séparateur. Un senseur électronique placé dans la préfosse active le départ et l'arrêt du séparateur selon le niveau de lisier. Le séparateur traite tant et aussi longtemps qu'il y a du lisier dans la préfosse. Chacune des étapes du procédé est indépendante et fonctionne par groupe. Lorsque le niveau de liquide à traiter est suffisamment élevé, l'unité démarre et traite jusqu'à la fin. Ensuite, l'unité de traitement s'arrête, se nettoie et se met en attente jusqu'à ce que l'unité précédente ait produit suffisamment de liquide pour un autre groupe. Chaque unité du système est capable de s'auto-nettoyer lorsqu'elle perd de son efficacité. Cela peu survenir plusieurs fois à intervalle plus ou moins rapproché dépendamment du type et de la quantité de lisier à traiter.

TÉLÉMÉTRIE

« Personne n'a le droit de polluer… »

Le système Purin Pur Inc. possède une technologie enviable. Étant donné que ce procédé est 100 % mécanique, les ingénieurs ont été capables d'intégrer 118 paramètres mesurables acheminés par modem à l'ordinateur principal de la compagnie. Tous les jours à un horaire fixe, le système transmet ses données à distance peu importe l'endroit ou il se trouve. De plus, la télémétrie et l'acquisition de données permettent de mesurer l'efficacité du système ainsi que les quantités de lisier et de liquide traités par chacune de ces unités. Ce système permet également de surveiller à distance la progression du traitement et de détecter rapidement les problèmes lorsqu'ils surviennent afin d'y remédier dans un délai très court.

COMPOSANTES

La compagnie Purin-Pur Inc. n'a pas hésité dans le choix de composantes de qualité (compresseur, moteurs, refroidisseur et valves). L'air entourant le système est fortement chargé de vapeur d'ammoniaque contenue dans le lisier. Chaque composante à été sélectionnée pour résister à une utilisation continue et à la corrosion. Le panneau de contrôle où est inséré un ventilateur amenant l'air de l'extérieur du bâtiment à l'intérieur du panneau en est un exemple. Il permet d'éviter la mise en contact des pièces électroniques avec l'air ambiant de la chambre, ce qui évite la corrosion.

RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT

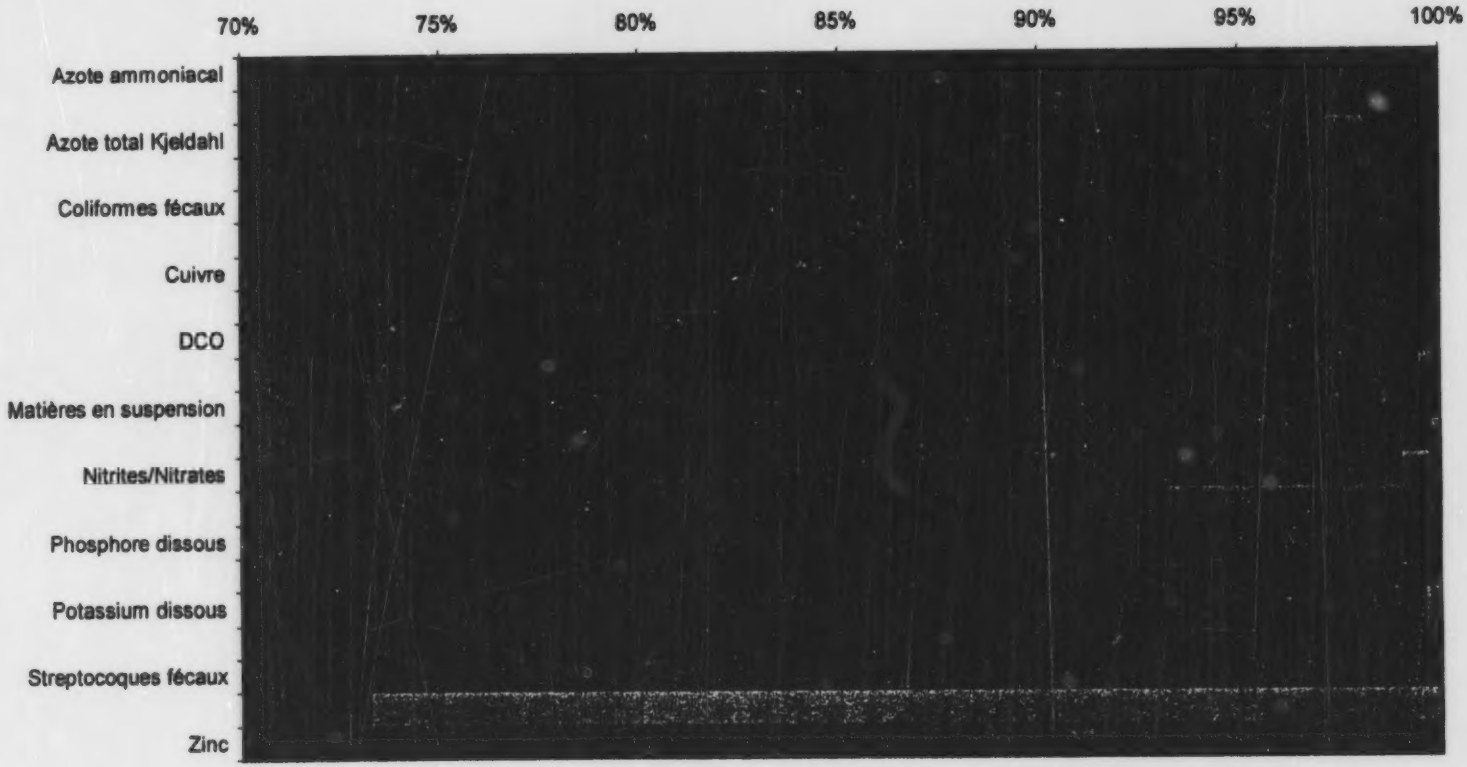
La Recherche & le Développement font partie intégrante de notre quotidien. Nous désirons améliorer les techniques utilisées et développer de nouveaux instruments de travail. Nous examinons également la possibilité de compléter notre procédé par d'autres technologies qui nous permettraient de réutiliser à 100 % toutes les composantes du lisier de porc. Nous souhaitons éliminer la pollution mais également le gaspillage de matières organiques recyclables. Nos efforts sont également dirigés vers une réduction des coûts de fabrication et d'utilisation du procédé Purin Pur. Nos vitrines technologiques nous permettent d'expérimenter et d'améliorer constamment notre procédé ainsi que les composantes du système et ce pour réussir à commercialiser un produit fiable, efficace et de très haute qualité.

COÛTS

Nos coûts ont été revus à la baisse grâce à notre partenariat avec une firme de Drummondville. Nous sommes maintenant en mesure d'offrir un système complet de traitement de lisier à un prix très abordable pour le producteur.

Pourcentage d'enlèvement du procédé Purin-Pur

(Données tirées du Rapport technico-économique de la Vitrine technologique de Meunerie Ducharme)



TRAITEMENT DE SOLIDES DE LISIER DE PORC PAR OXYDATION HUMIDE ASSISTÉE PAR PLASMA

Claude B. Laflamme[1], Jean Meunier[1], Roch Joncas[2], Daniel-Yves Martin[2] et Michel Côté[2]

[1]Laboratoire des technologies électriques et des électrotechnologies (LTEE) d'Hydro-Québec, Shawinigan, Québec, G9N 7N5 < laflamme.claude@ltee.hydro.qc.ca >
[2]Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Deschambault, Québec, G0A 1S0 < Roch.Joncas@irda.qc.ca >

RÉSUMÉ :

La technologie d'oxydation humide assistée par plasma (OHAP), développée pour le traitement de boues issues de procédés de déshydratation conventionnels et contenant entre 20 et 30 % de matières organiques, offre un potentiel intéressant dans la gestion des surplus de lisier de porc. La charge organique des boues est détruite en continu, en présence d'air, à une température modérée de four d'environ 600°C et à pression atmosphérique, pour produire des cendres granuleuses, inertes, sèches, stériles et sans odeurs représentant moins de 3 % de la masse initiale des boues traitées. Le procédé confine l'énergie d'oxydation des matières organiques pour évaporer l'eau et chauffer les produits ainsi que les résidus, permettant une consommation nette d'énergie électrique inférieure à 100 kWh par tonne de boues humides traitées. L'élément clé de la technologie est l'utilisation d'une torche à plasma de faible puissance qui catalyse le processus d'oxydation, autrement difficile à obtenir dans ces conditions de température et d'humidité des boues.

À l'automne 2000, l'IRDA et le LTEE d'Hydro-Québec ont prélevé et traité par le procédé OHAP 200 kg de solide de lisier de porc afin d'établir la faisabilité d'utiliser cette technologie pour traiter du lisier de porc. Le lisier de porc, pompé directement de la fosse d'une ferme porcine de St-Lambert-de-Lévis, a été séparé à l'aide d'une presse à vis FAN de 20 m^3/h de capacité. Par la suite, le solide de lisier à 25 % de matière sèche a été séché au LTEE à Shawinigan. Un bilan thermique du procédé et un bilan agronomique seront présentés.

TRAITEMENT ANAÉROBIE À TEMPÉRATURE AMBIANTE DU PURIN DE PORC

Gérard Laganière

Bio-Terre Systems Inc., 150, rue Vimy nord, Sherbrooke,QC, J1J 3M7
<glaganiere@smnetcom.com>

RÉSUMÉ

Le traitement de purin de porc développé par Bio-Terre Systems Inc. utilise des micro-organismes anaérobies à basse température (15 à 20°C). La technologie est simple, économique, et adaptable tant sur les petites que sur les grandes fermes. Le procédé stabilise le lisier, récupère de l'énergie, conserve les éléments fertilisants et réduit les odeurs.

Le lisier brut est acheminé dans un réacteur. Durant un cycle de 14 jours pour la réaction et la sédimentation, le procédé permet de réduire jusqu'à 70% des solides totaux, 83% de la demande chimique d'oxygène (DCO) et 80% des solides volatils. Les solides sont convertis en biogaz formés principalement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2).

Le procédé Bio-Terre a été évalué à la Ferme Richard Péloquin de Sainte-Edwidge au Québec. On a estimé que chaque mètre cube de lisier pouvait produire 60 mètres cube de méthane, dont la valeur énergétique équivaut à 15 $. On obtient une réduction d'odeur à un niveau non perceptible lors des purges du réacteur.

En bref, la technologie Bio-Terre utilise les infrastructures de manutention et d'entreposage existantes. Elle n'interfère pas avec les opérations journalières à la ferme. Elle peut être utilisée sur des fermes de différentes grosseurs. Elle nécessite de faibles coûts d'investissement et d'exploitation. Elle ne nécessite pas de personnel spécialisé. Elle est idéale pour des exploitations porcines qui disposent d'une surface réduite pour l'épandage des lisiers et qui peuvent bien utiliser l'énergie provenant des biogaz.

21 mars 2001
13h25 à 15h00

Thème 5 : Chauffage et cuisson des aliments

Modératrice : V. Paris

ÉTAT DE L'ART EN CUISSON DES PRODUITS AMYLACÉS

M. Marcotte

Centre de recherche et de développement sur les aliments, Agriculture et Agroalimentaire Canada
3600, boul. Casavant Ouest, Saint-Hyacinthe, Québec, J2S 8E3
< marcottem@em.agr.ca >

INTRODUCTION

À l'heure actuelle, il est difficile de reproduire en laboratoire les conditions de cuisson industrielle. En général, la plupart des fours industriels de type tunnel fonctionnent en continu, plutôt que par lot (p. ex. les fours de laboratoire). **Les produits y sont soumis à diverses conditions qui varient dans le temps et qui en affectent leur qualité.** Les phénomènes physiques et chimiques qui se passent au cours de la cuisson des produits de pâtisserie et de biscuiterie sont très complexes et peu compris dans un contexte industriel. Les nouveaux produits sont donc mis au point directement dans les installations industrielles par essais et erreurs. Cette approche coûte très cher car il faut procéder à de nombreux essais expérimentaux avec des quantités suffisantes de matières premières. Une mauvaise compréhension de l'influence des cycles de cuisson sur la qualité des produits engendre des situations où les phénomènes voulus de formation de croûte, d'évaporation d'eau, d'expansion du volume des produits possédant la texture et la fraîcheur désirée, soit qui 1) ne se produiront pas du tout; 2) ne se produiront pas de façon optimale ou 3) ne se produiront pas à des temps opportuns. D'une part, la recherche permet de comprendre l'ordre dans lequel ces phénomènes se produisent en cours de cuisson et, d'autre part, l'intégration de ces connaissances peut guider plus systématiquement le développement d'un cycle de cuisson pour un produit en développement. L'étude des phénomènes impliqués dans la cuisson permet d'envisager une optimisation, donc le choix de cycles de cuisson mieux adaptés aux modes de transfert de chaleur de façon à obtenir des produits de qualité supérieure tout en minimisant l'énergie requise dans les processus de cuisson.

OBJECTIF

Cet exposé traite de l'approche scientifique utilisée pour comprendre les cuissons industrielles et pour modifier les procédés en conséquence permettant l'obtention de profils de cuisson optimaux.

REVUE DES PRINCIPES

Transfert de chaleur

Rappelons que lors du développement de produit, la cuisson se fait généralement en «batch» dans un four de type cuisine. Pour la plupart des cuissons industrielles, les produits sont cuits en continu dans des fours tunnels (Almond, 1989; Matz, 1989). Différents profils industriels de cuisson peuvent être ainsi observés variant surtout les températures des chambres de cuisson haute (au-

dessus du produit) et basse (au-dessous du produit) des différentes zones (sections de l'entrée vers la sortie) du four. Industriellement, on caractérise les conditions du four par la prise des températures à l'aide de thermocouples à différents endroits du four. Dépendamment du type de cuisson, l'opérateur de four spécifiera le nombre de brûleurs qui doivent être allumés de même que l'ouverture des cheminées et portes. Selon les fours, les températures peuvent être également prises dans les chambres haute et basse. On peut retrouver divers profils en cloche (p. ex. la température monte et ensuite descend), ascendant (la température monte du début à la fin de la cuisson) ou descendant (la température descend tout au long de la cuisson).

La chaleur durant la cuisson industrielle est transmise par radiation, convection et conduction. La proportion de chacun des modes de transferts de chaleur varie en fonction du type de four utilisé (Almond, 1989). Les fours actuels ne permettent pas de contrôler la cuisson par radiation qui compte pour au delà de 50-80% de la proportion totale de l'apport de chaleur. Habituellement, la convection est minimale à l'intérieur des fours conventionnels de cuisson pour les gâteaux mais elle peut être considérable pour la cuisson des biscuits. L'augmentation de la chaleur provenant de la radiation est liée à une augmentation de la température demandée. Des mouvements d'air dans les zones de cuisson permettent la transmission de la chaleur par convection. Celle-ci peut être naturelle ou forcée. La convection forcée nécessite la présence d'un ventilateur qui pousse l'air chaud plus ou moins rapidement à la surface des produits ou du moins la génération de courants d'air importants à l'intérieur du four par l'ouverture de trappes ou cheminées. Il est donc extrêmement important de pouvoir évaluer le coefficient de transfert de chaleur par convection et aussi par radiation dans le four afin de pouvoir identifier quel est le mode de transfert de chaleur qui influence le plus la cuisson et de quantifier la contribution de chacun des modes de transfert de la chaleur. Li & Walker (1996) ont utilisé un moniteur h qui consiste en deux plaques d'aluminium reliées à un thermocouple de type K. Un enregistreur (Super Multi Occurant Logger Evaluator, SMOLE) relie la température en fonction du temps. C'est à partir de ces données que le coefficient global de transfert de chaleur peut être calculé. Au moyen d'une corrélation mathématique, il est possible d'estimer la contribution de la convection et d'obtenir par différence la contribution de la radiation. Des méthodes ont été développées et utilisées pour permettre de mieux comprendre ces divers phénomènes de transfert de chaleur en conditions de cuisson industrielle.

Transfert de masse

On oublie à tort que la cuisson est aussi un procédé de séchage. L'évaporation d'eau considérable du produit vers la chambre de cuisson engendre un taux d'humidité qui est très variable à l'intérieur des fours industriels et qui dépend des systèmes d'évacuation (p. ex. cheminées et trappes). Il existe peu de données expérimentales sur les taux d'humidité dans les zones de cuisson des fours industriels et sur l'effet de ces conditions d'humidité sur la cuisson des produits. De plus, maintenir une grande quantité d'eau dans la chambre de cuisson n'est pas optimale car l'énergie requise pour maintenir la température du four doit être plus élevée afin de maintenir l'eau contenue dans la chambre à l'état de vapeur. Dans l'industrie, il est bien connu que la température des fours doit être augmentée graduellement dans la journée après le démarrage des fours le matin à cause de l'augmentation de la quantité d'eau. Par expérience, il est aussi reconnu que l'environnement des produits en début de cuisson doit contenir une certaine quantité d'eau afin d'éviter le brûlage de surface, un croûtage trop important ou un séchage prématuré. De plus, les fours industriels à gaz direct sont reconnus pour contenir plus d'eau que les fours électriques car la combustion d'une

molécule de méthane CH_4 et de 2 molécules d'O_2 produit 2 molécules d'H_2O et une molécule de CO_2. Il y a donc place à l'optimisation des cuissons en fonction du contenu en eau dans les chambres qui dépend de l'évacuation et des types de fours. Il existe peu de données sur l'impact des transferts d'eau sur la cuisson des produits.

Caractérisation des fours industriels

Pour bien comprendre le procédé de cuisson, il faut pouvoir caractériser la boîte noire qu'est le four industriel. En résumé, ce sont les transferts de chaleur et de masse qu'il faut évaluer et déterminer. Il faut donc mesurer conditions internes des chambres et des zones de cuisson qui influencent ces transferts de chaleur et d'eau, soit les facteurs suivants qui sont : la vitesse de l'air, l'humidité de l'air, la température du four, le rapport surface/volume des produits en rapport avec la surface de cuisson, les profils de température, les sources de chaleur en bas ou en haut et les conditions des parois (température et émissivité) et le coefficient de transfert de chaleur.

Une série de méthodes ont dû être développées ou adaptées pour permettre la mesure de ces différents paramètres. On s'en est servi pour faire le diagnostic de quelques fours industriels de cuisson. On s'est aperçu que certaines mesures étaient impossibles à faire dans les fours industriels comme les températures de parois (en relation directe avec le transfert de chaleur par radiation). On a donc dû développer une méthode indirecte d'évaluation des températures de parois en utilisant le h-monitor. Toutefois, dû à la configuration de fours à gâteaux à bande, les températures des parois sous la bande n'ont pu être estimées. De plus, comme le moniteur h est volumineux en épaisseur et en largeur, il s'est avéré impossible de l'utiliser pour obtenir une estimation des températures des parois dans tous les fours à biscuits. Une série de mesures ont été réalisées sur des cuissons industrielles des gâteaux et biscuits (Baik *et al.*, 1999ab; Baik, 2000; Baik *et al.*, 2000ab).

Conditions de cuisson industrielle vs. qualité

Effet sur la qualité des gâteaux

Rappelons qu'il est reconnu que la cuisson ou la qualité du produit cuit est fortement influencée par la formulation ou le choix des ingrédients. Ainsi, les mesures d'humidité et d'activité de l'eau des échantillons au cours de la cuisson et sur le produit final permettent de mesurer l'évolution des phénomènes d'évaporation d'eau dans le produit et de séchage de la surface en cours de cuisson (Stear, 1990). Les mesures de densité ou de porosité des gâteaux permettent de mesurer l'impact de l'expansion des bulles d'air et le phénomène de gonflement du gâteau sur le produit final et ainsi d'avoir une estimation des changements de volume des produits. De plus, des photographies en cours de cuisson et l'évaluation des volumes des gâteaux au cours de la cuisson permettent de visualiser les changements macroscopiques ou globaux dans la structure (Shepherd & Yoell, 1976). La microscopie électronique permet d'observer qualitativement le réseau de l'émulsion de gâteau au cours de la cuisson à un niveau moléculaire et de relier ces observations à la texture des produits (Taranto, 1983). Les mesures de l'analyse enthalpique différentielle (i.e. DSC) permettent d'étudier les interactions des ingrédients dans les gâteaux, le degré de gélatinisation de l'amidon, la dénaturation des protéines, la température de transition vitreuse et de simuler des cycles de cuisson à échelle réduite. Enfin, la mesure de la couleur en surface permet de caractériser le développement du brunissement de la surface de la croûte (Wade, 1988). Tous ces paramètres vont influencer la texture qui est le reflet de leur influence globale.

De plus, la prise de données dans les fours industriels, combinée à diverses expériences en conditions contrôlées dans le four laboratoire et le four pilote de cuisson des gâteaux, a permis de dégager l'importance des conditions industrielles de cuisson en ce qui a trait à ses effets sur la qualité des produits. Cela a également permis de développer une stratégie d'approche basée sur la logique pour suggérer des modifications au cycle de cuisson en cas d'écarts.

Modélisation des phénomènes

De Vries et al. (1995) ont déjà reconnu un besoin pour l'élaboration d'un modèle de simulation mathématique pouvant décrire tous les niveaux du procédé de cuisson, soit **1) la relation entre les points de contrôles des fours et les conditions de la chambre de cuisson; 2) le transfert de chaleur et d'humidité dans la chambre de cuisson; 3) le transfert de chaleur et d'humidité dans le produit et finalement 4) la cinétique des transformations chimiques et physiques afin d'optimiser et de contrôler les fours industriels.** Il existe plusieurs justifications à la modélisation mathématique de la cuisson des produits de pâtisserie et de biscuiterie. Carvalho & Martins (1992) ont rapporté ces raisons qui permettent principalement : 1) une optimisation des procédés de cuisson; 2) une rationalisation des dépenses énergétiques; 3) un développement d'outils utiles menant à la conception d'un nouveau type de four et 4) un intérêt général dans la recherche fondamentale de la compréhension des phénomènes survenant en cours de cuisson. Une revue de littérature portant sur les modèles de transfert de chaleur et d'humidité au cours des procédés de cuisson des produits de boulangerie, pâtisserie et biscuiterie (Sablani *et al.*, 1998) indique que la plupart des travaux de recherche publiés dans le domaine ont porté sur le transfert de chaleur et de l'humidité dans le produit sans décrire les conditions de chaleur et d'humidité dans la chambre de cuisson et la cinétique des changements physico-chimiques. Il existe peu de travaux sur les gâteaux. De plus, on a surtout développé des modèles pour la cuisson des pains et des biscuits. Certains modèles ont été développés pour décrire le transfert de chaleur et de masse dans les chambres de cuisson des biscuits (Standing, 1974; Savoye *et al.*, 1992; Fahloul *et al.*, 1994) avec des hypothèses de simplification.

Un travail de modélisation des transferts de chaleur, masse et quantité de mouvement dans les fours de laboratoire, pilote et industriel et dans les gâteaux est présentement en cours de réalisation en utilisant un logiciel d'éléments finis FIDAP (Fluent). L'analyse de la configuration et de la géométrie des fours et de ses effets sur les conditions de cuisson industrielle est essentielle. De même, pour la description des transferts de chaleur et d'eau dans les produits, il est important d'obtenir des mesures réelles des propriétés thermophysiques. Une série de méthodes ont aussi été adaptées pour la mesure de celles-ci en conditions de cuisson industrielle.

CONCLUSIONS

Malgré le fait que la cuisson existe depuis des millénaires, jusqu'à tout récemment elle était encore considérée comme un art plutôt qu'une science. Pour permettre, d'établir de façon optimale les cycles de cuisson, il est important de bien comprendre le procédé. La génération de cette connaissance nécessite toute une série d'actions qui seront décrites dans cet exposé. L'avènement de nouveaux outils informatiques permet aussi d'envisager la réalisation future de cuisson virtuelle sans la réalisation d'expérimentations physiques. Ces outils pourront 1) servir à suggérer des améliorations importantes à apporter sur les fours existants et aussi 1) servir à la conception de nouveaux fours de cuisson plus adaptés à la réalité industrielle.

REMERCIEMENTS

L'auteur reconnaît la contribution de l'office de la recherche et du développement en énergie (projet PERD) de Ressources Naturelles Canada et de Culinar (projet PPFI) qui ont permis la réalisation de tous ces travaux. L'aide d'Oon Doo Baik, de Marcel Tanguay, de Maher Trigui, de Mohammed Reza Zareifard et de François Brunet et de nombreux étudiants en stage a été grandement appréciée de même que la collaboration scientifique du Dr François Castaigne de l'Université Laval et du Dr Michel Dostie du Laboratoire des techniques électrochimiques et des électrotechnologies (LTÉE) d'Hydro-Québec et de toute l'équipe de Culinar en particulier Marie-Claude Poiré, Anne L'Heureux, Gérald Lamontagne et Jessica Pitre.

RÉFÉRENCES

[1] Almond, N. (1989) Baking. *in: Biscuits, cookies and crackers*. Vol. 2. The Biscuit Making Process. Elsevier Applied Science, Barking, Essex. Chap. 6: pp. 175-191.

[2] Baik, O.D. (2000) Characterization of heat transfer during cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens. *Ph.D. Thesis*.Département des sciences des aliments et nutrition, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval, Québec, Canada.

[3] Baik, O.D., Marcotte, M. and Castaigne, F. (2000a) Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens. Part I. Characterization of baking conditions. Food Research International 33: 587-598.

[4] Baik, O.D., Marcotte, M. and Castaigne, F. (2000b) Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens. Part II. Evaluation of quality parameters. Food Research International 33: 599-607.

[5] Baik, O.D., Sablani, S.S., Marcotte, M. and Castaigne, F. (1999a) Modelling the thermal properties of a Cup Cake during baking. J. Food Sci. 64:295-299.

[5] Baik, O.D., Grabowski, S., Trigui, M., Marcotte, M. and Castaigne, F. (1999b) Heat transfer coefficients on cakes baked in a tunnel type industrial oven. J. Food Sci.64:688-694.

[6] Carvalho, M.G., and Martins, N. (1992) Mathematical modelling of heat and mass transfer in a forced convention baking oven. *In: AIChE Symposium Series-Heat Transfer*, San Diego Ca, pp.205-211.

[7] De Vries, U., Velthuis, U. and Koster, K. (1995) Baking ovens and product quality: a computer model. *Food Science and Technology Today* 9(4):232-234.

[8] Fahloul, D., Trystram, G., Duquenoy, A. and Barbotteau, I. (1994) Modeling heat and mass transfer in band oven biscuit baking. Lebensm.-Wiss. u-Technol. 27(20):119-124.

[9] Li, A. and Walker, C.E. (1996) Cake baking in conventional, impingement and hybrid ovens. J. Food Sci. 61:188-191, 197.

[10] Matz, S.A. (1989) Equipment for bakers: Chap. 9 Ovens and baking. Pan-Tech International Inc. pp.319-361.

[11] Pyler E .J. (1988). *Baking Science and Technology*, Vol. 2, 3rd ed., Chapitre 18: The baking process, ed. Sosland Pub. Co., Merriam, Kan.

[12] Sablani, S.S., Marcotte, M., Baik, O.D. and Castaigne, F. (1998) Modelling of simultaneous heat and water transport in the baking process. J. Food Sci. 31:201-209.

[13] Savoye, I., Trystram, G., Duquenoy, A., Brunet, P. and Marchin, F. (1992) Heat and Mass transfer dynamic modeling of an indirect biscuit baking tunnel oven. Part 1: Modeling Principles. J. Food Eng. 16:173-196.

[14] Shepherd, I.S. and Yoell, R.W. (1976) Cake Emulsions *in: Food Emulsions.* S. Friberg ed. Marcel Dekker Inc., New York. pp.216-275.

[15] Standing, N.C. (1974) Individual heat transfer modes in band oven biscuit baking. J. Food Sci. 39:267-271.

[16] Stear, C.A. (1990) Handbook of Breadmaking Technology. Elsevier Applied Science. Chap. 3.1 Aims and Requirements of the Baking Process.

[17] Taranto, M.V. (1983) Structural and Textural Characteristics of Baked Goods. *in: Physical Properties of Foods.* Peleg & Bagley eds.

[18] Wade, P. (1988) Biscuit Baking. *in: Biscuits, cookies and crackers.* Vol. 1. The Principles of the Craft. Elsevier Applied Science, Barking, Essex. Chap. 3. pp. 54-81.

LA CUISSON OHMIQUE DES PRODUITS CARNÉS A-T-ELLE UN AVENIR ?

Gabriel Piette[1], Marie Lou Buteau[1], Damien de Halleux[2], Michel Dostie[3], Hosahalli Ramaswamy[4] et Yves Raymond[1]

[1] Agriculture et agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les aliments, 3600 boulevard Casavant ouest, St-Hyacinthe, Québec, J2S 8E3 < pietteg@em.agr.ca >
[2]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4
[3] Laboratoire des technologies électrochimiques et des électrotechnologies d'Hydro-Québec, 600 avenue de la Montagne, Shawinigan, Québec, G9N 7N5
[4] Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Macdonald campus of McGill University, 21111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 1C0

RÉSUMÉ :

Bien que le passage forcé d'un courant électrique à travers les produits carnés (chauffage ohmique) ait été proposé comme méthode de cuisson dès 1882 (De AlwisAAP and PJ Fryer, 1990. J. Food Eng. 11:3-27), le concept n'a pas encore mené à des applications commerciales dans le secteur des viandes. Les premiers essais de mise au point d'un équipement industriel pour la cuisson en continu des émulsions de viande ont été abandonnés (Vanhatalo I *et al.*, 1978. German Patent 27 46 680; Mälkki Y and A Jussila, 1979. Food Proc. Eng. 1:616-619), dû à la difficulté de maintenir l'état stationnaire à long terme. Cependant, les récents succès dans le développement de la cuisson ohmique des produits liquides et particulaires ont soulevé un intérêt nouveau pour la cuisson ohmique des produits solides, incluant les produits carnés (Peyron A, 1996. Viandes Prod. Carnés. 17:255-262; Piette G *et al.*, 2000a. Proc. Int. Cong. Meat Sci. Technol. 46:244-245; Piette G *et al.*, 2000b. Proc. Int. Cong. Meat Sci. Technol. 46:246-247), et les résultats obtenus ont été assez prometteurs pour encourager le secteur privé à réétudier la cuisson en continu des mêlées de viande par chauffage ohmique (Anonyme, 2000. Cahiers des Industries Alimentaires. 47:3-12). La présentation suivante fait le bilan de notre connaissance des applications du chauffage ohmique aux produits carnés et évalue les chances d'application commerciale de la technologie dans un avenir proche.

OHMIC HEATING OF HAM EMULSIONS

Lawrende Chiu[1], Hosahalli S. Ramaswamy[1] and Gabriel Piette[2]

[1]Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Macdonald Campus of McGill University, 21111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9
< lchiu@po-box.mcgill.ca >, < ramaswamy@macdonald.mcgill.ca >
[2] Agriculture et agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les aliments, 3600 boulevard Casavant ouest, St-Hyacinthe, Québec, J2S 8E3
< pietteg@em.agr.ca >

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the quality changes (color, texture, cooling loss, water holding capacity, and water activity) associated with fine ham emulsions under Ohmic heating conditions, and compare them with changes observed in traditional water bath cooking. Samples of raw fine ham emulsion were prepared according to a standard industry formulation. Conventional heating generally involved a come-up time of about 20 min and after the come-up the test samples were held for up to 30 min at 60, 70 and 80 °C prior to quality evaluation. A static Ohmic heating cell was used. The voltage was sequentially varied and time profiles for fine ham emulsion were evaluated to determine the come-up-times and final temperatures. From the time-temperature and voltage data, Ohmic heating treatment times required to achieve the desired heating rates were evaluated: 5, 10, and 20 min come-up time at the pre-selected temperature (60, 70, and 80°C) and 2 holding times (20, 30min) after the selected temperature is reached. The 5 and 10 min come-up thus constituted more rapid heating conditions than that was possible under conventional heating.

As compared to the conventionally cooked product, ham emulsions cooked under Ohmic heating conditions had a significantly lighter color, softer and chewier texture ($p<0.05$). The associated water holding capacity and cooking loss were also significantly ($p<0.05$) lower in Ohmic heated samples than the conventionally cooked samples. Further, cooking temperature and come-up time significantly influenced the color and texture of Ohmic heated test samples with lower temperatures and shorter come-up times showing lighter color and softer texture. These results show that the rapid heating achieved under Ohmic heating conditions provide some improvements in product quality as compared to the conventional heating method. In addition, cooking time can be reduced by as much as 75% which could result in better production rate.

RADIO FREQUENCY HEATING OF VISCOUS FOODS

George Awuah[1], Hosahalli S. Ramaswamy[1], Punidadas Piyasena[2] and Cheryl Defelice[2]

[1]Department of Food Science and Agriculture Chemistry, Macdonald Campus of McGill University, 21111 Lakeshore Rd, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9
< gawuah@hotmail.com >, < ramaswamy@macdonald.mcgill.ca >
[2]Food Research Program, Agriculture and Agri-Food Canada,
93 Stone Road West, Guelph, Ontario, NIG 2W1

ABSTRACT

Recently, there has been a renewed interest to extend the potential of radio frequency (RF) heating to viscous liquids containing discrete particles. RF properties that could be taken advantage of to enhance the overall quality of particulate-laden products include rapid heating, high penetration depth and short residence times. The objective of this study was to evaluate the effect of flow rate, RF power level, concentration, pH, added salt and sugar on temperature change (ΔT) across the applicator tube of a 1.5 kW pilot-scale RF unit. Starch solutions (1 to 4% w/w) were used at three different flow rates (0.35, 0.5 and 1 L/min) and four power levels (672, 912, 1152 and 1392 W). The effect of added salt (0 to 0.8 w/w), sugar (0 to 2%) and pH (3.98 to 8.02) were studied at 0.5 L/min.

The heating rate of starch solutions varied from 4 to 15 C/min depending on flow rate, concentration and power level. Fluid flow rate and power level had significant impact ($p < 0.05$) on temperature change (ΔT). The individual effects of both salt and power had significant influence ($p < 0.01$) on ΔT. Although the combined effect of salt and concentration had an influence ($p < 0.05$) on ΔT, observed trends were not clear cut. The individual effects of either pH or sugar was not significant ($p > 0.05$) on ΔT due probably to their low conductivities. However, their combined effect on ΔT was significant. The insignificance of pH was probably due to the relatively weak organic acid used in the present study.

THERMAL PROCESS MODELING USING NEURAL NETWORKS

Cuiren Chen and Hosahalli S. Ramaswamy

Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Macdonald Campus of McGill University, 21111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9
< cchen38@po-box.mcgill.ca >, < ramaswamy@macdonald.mcgill.ca >

ABSTRACT

Two neural network models, a moving-window neural network and a hybrid model which combines neural network with polynomial regression models, were used for modeling of lethality F(t) and quality retention QR(t) dynamic functions under constant temperature retort processing. The dynamic functions involved six variables: retort temperature (116-132 C), thermal diffusivity (1.5-2.3×10^{-7} m^2/s), can radius (40-60 mm), can height (40-100 mm), and quality kinetic parameters z (15-39 C) and D (150-250 min). Computer simulations were used for providing the fundamental data for training and evaluation. Training data were constructed by a central composite design. The optimal networks were obtained by the varying number of hidden layers, number of neurons in hidden layer and learning runs, and a combination of learning rules and transfer function. The ANN model performance with the optimal configuration was validated by an independent data set. Results demonstrated that both models with the optimal configuration well described the F(t) and QR(t) dynamic functions, but the moving–window network had better modeling performance than the hybrid ANN model. A comparison of the configuration parameters, however, indicated that the moving-window models required more neurons in hidden layer and more learning runs for training than the hybrid models.

POROSITY AND PORE SIZE DISTRIBUTION IN FRIED CHICKEN MEAT

L. Kassama and M.O. Ngadi

Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University
Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9
< lkassama@po-box.mcgill.ca >, < ngadi@macdonald.mcgill.ca >

ABSTRACT

Pores and pore size distribution in porous solid foods influence mass transfer during processing. The objective of this study was to characterize porosity and pore size distribution in fried chicken meat. Temperature of the frying medium was maintained at 140, 160 and 180 °C. Frying times were 30, 60, 90, 120, 180, 240, 480, 540, and 600 s. Moisture and fat contents of fried samples were measured using standard methods. Porosity and pore size distributions were measured using both mercury intrusion porosimeter and helium pycnometer. Frying temperature and time influenced porosity and pore sizes of samples. Results of the study will be useful in understanding the dynamics of fat absorption during deep fat frying. It will enhance optimization of fried product quality.

21 mars 2001
13h25 à 15h00

Thème 6 : Traitement, emballage et entreposage

Modérateur : C. Vigneault

LA TECHNOLOGIE DES CELLULES IMMOBILISÉES POUR LA PRODUCTION D'INGRÉDIENTS ET DE CULTURES BACTÉRIENNES DESTINÉS À L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Claude P. Champagne et Nancy J. Gardner

Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 3600, boul. Casavant ouest, St-Hyacinthe, Québec, J2S 8E3
< ChampagneC@em.agr.ca >

RÉSUMÉ :

La technologie des cellules immobilisées (TCI) s'emploie industriellement pour la fabrication de bières et de vin. Cette technologie permet de raccourcir des temps de fermentation ou d'épargner de la main d'œuvre. Au CRDA la TCI fut employée pour la production de ferments lactiques concentrés, la production de cultures protégées contre les bactériophages, la préparation de ferments à activité réduite en maturation ainsi que pour la production d'acides organiques sur lactosérum ou sur extraits de levure. Nous présenterons l'évolution de nos travaux sur ces applications.

La technologie employée au CRDA repose sur la production de billes d'alginate. Les avantages et inconvénients de cette matrice ainsi que de la TCI seront présentés. La production de billes à échelle 1000 L constitue une problématique qui a fait l'objet de certains de nos travaux. Un prototype de production de billes par «vortex-bowl» sera présenté, ainsi que les techniques disponibles sur le marché actuellement.

DEVELOPMENT OF A NEW PERMITTIVITY ANALYZER AT TWO ISM (915 & 2450 MHZ) FREQUENCIES USING CAVITY PERTURBATION TECHNIQUE.

M.S. Venkatesh and G.S.V. Raghavan

Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University,
Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X3V9
< mvenka@po-box.mcgill.ca >, < Raghavan@macdonald.mcgill.ca >

ABSTRACT

Electromagnetic energy utilization has been reported in an increased number of biological, agri-food and environmental applications in recent times. Understanding the materials' dielectric properties is important from two points of view. First, since they are transient during processing, functional relationships describing these changes are needed for process control and optimization. Second, since dielectric properties are intrinsically related to specific and bulk characteristics of materials, the development of rapid measurement techniques can potentially lead to rapid indirect determination of a multitude of material's properties.

In this study an effort will be made to discuss the development of a new permittivity analyzer to measure the dielectric properties (permittivity) of materials at two major ISM approved frequencies; 915 MHz and 2450 MHz using Cavity Perturbation Technique (CPT). Preliminary results of selected agricultural and food materials will be presented. The performance of the permittivity analyzer can be accounted based on the results of the measurements. Further work is required to fully justify the variation in the behaviour of various materials.

Key Words: Permittivity, dielectric constant, loss factor, perturbation

INTRODUCTION

The development of microwave processing applications is to some extent hampered by the lack of adequate dielectric data for many materials. Literature data are scarce particularly for various classes of solid and powdered compounds susceptible to being used in high temperature environment. Furthermore, instrumentation for the dynamic measurement of the dielectric parameters have not been successfully developed to satisfy the needs of microwave applications. Today, research in this area focuses on the measurement of dielectric properties, the development of techniques to measure parametric values which help determine these properties, and the development of electro-technologies.

The electrical basis of interaction is described in terms of the complex dielectric properties - dielectric constant (ε') and dielectric loss factor (ε''). These respectively represent the proportion of impinging energy that can penetrate the material, and the amount of energy that can be absorbed and dissipated.

These two parameters are functions of the specific characteristics of the material and of temperature, for a given frequency.

IMPORTANCE OF DIELECTRIC PROPERTIES AND ITS MEASUREMENT

Measurement of dielectric properties is important from two points of view. First, since dielectric properties are transient during processing, functional relationships describing these changes are needed for process control and optimization. Second, since dielectric properties are intrinsically related to specific and bulk characteristics of materials, the development of rapid measurement techniques can potentially lead to rapid indirect determination of a multitude of material properties. The best known instance of this use is the dielectric determination of moisture content in materials requiring this parameter for quality control (Nelson et al, 1990). In recent years, ***dielectric measurements*** have gained more importance because of their capabilities in monitoring specific properties of materials undergoing physical or chemical changes (Gallone et al., 1996). At the microwave frequencies, in particular, the variation of the complex permittivity can monitor selectively the concentration change of groups with high mobility thus allowing the kinetics of chemical reactions to be monitored (Butta et al., 1995; Cocco, 1990). For such application, single frequency (915, 2450 MHz) measurement techniques are more accurate, faster and less expensive; in particular, those based on the use of a cavity resonator reach an unsurprised sensitivity and accuracy. Although a great deal of progress has been achieved in the development of instrumentation and in the understanding of the functional relationships between dielectric properties and other parameters, the growing trend towards microwave processing has created a need for more flexible equipment to quantify the dielectric properties of many agri-food products under a wider variety of conditions. Existing measurement technology is very expensive and the applicability / accuracy of the various measurement techniques to certain types of food material has been questioned (Sun et al., 1995).

The microwave resonant (perturbation) method is reported to be useful in moisture measurement of small samples. Kraszewski (1996) measured single soybean seed from the change of Q-factor and the resonance frequency shift using the resonant cavity of a rectangular waveguide. Okamura et al. (1998), using a resonator, measured small sample of paper from the change in Q-factor and the moist weight of the sample. Since profound understanding of the processes involved depends on accurate and instantaneous determination of the dielectric properties, the permittivity analyzer is therefore essential to further research and development. The terms 'dielectric analyzer' and 'permittivity analyzer' are treated the same in order to avoid confusion, as stated in other reports.

OBJECTIVES

The main objective is to further our understanding of the measuring technique and behavior of agricultural and food materials subjected to electromagnetic radiation. The specific objectives are:
(i) To develop a permittivity analyzer to operate at 2 major approved Industrial, Scientific and Medical (ISM frequencies (915, 2450 MHz) using the concept of cavity perturbation technique (CPT).
(ii) To estimate the dielectric constant and loss factor of standard reference materials.

MEASUREMENT OF DIELECTRIC PROPERTIES

Materials reflect, transmit and absorb microwave energy to various degrees. These interactions are governed primarily by their dielectric properties - the dielectric constant (ε') and the loss factor (ε") and to a certain degree by their surface characteristics. The relationships that these properties have with quantities that change during processing (temperature, moisture content, density), should be known in developing a processing strategy (microwave oven design, package design, process control, etc.).

PERTURBATION THEORY

It is well known that the insertion of a dielectric material different from air inside the cavity affects its resonant frequency, f_0 and quality factor, Q. If the sample is small enough compared to the cavity dimensions, perturbation theory may be used to link frequency shift to the dielectric constant and the quality factor shift to the loss factor. Presently, many passive and active techniques for measuring dielectric quantities are available and much work has been carried out by researchers using this method, thus proving it to be a very powerful tool of investigation.

The survey and the experimental procedures as well as the results of the well known cavity perturbation technique (CPT), commonly employed for measuring the dielectric properties of materials have been reported (Altschuler, 1963; Gallone et al., 1996; Venkatesh, 1996 and Okamura et al., 1998). This method allows for simple and precise cavity measurements and also improves the rapidity, which makes it useful for process monitoring applications.

The experimental requirement of CPT consists in the determination of the characteristic parameters of a resonant cavity, namely the resonance frequency and the merit factor Q (Q-factor) of the cavity. The parameters have to be measured with the empty cavity and with a small dielectric sample, properly inserted. Then the real and imaginary parts of the complex permittivity can be calculated. All known techniques feature the resonant frequency measurement by taking the minimum of the power reflected and the maximum power transmitted by the cavity to the external network during an appropriate frequency sweep (Ney and Gardiol, 1977), or in phase-lock conditions (Akyel et al., 1978; Gallone et al., 1996). The Q-factor is usually found by measuring the positions of the -3 dB points in the resonance curve with appropriate coupling conditions, although it is possible to measure the Q-factor directly from the decay time of the output signal of a cavity excited by microwave pulses (Montgomery, 1947) or through the phase shift with a frequency tracking system (Akyel et al., 1978).

When the aim of an experiment is the study of dielectric properties of a material for monitoring some chemical or physical processes, the response time (reaction time) of the experimental apparatus must be sufficiently small in comparison with the time scale involved in the process. As a consequence, when dealing with such purposes, researchers have so far neglected techniques involving time consuming frequency sweeps, turning rather to phase-lock methods (Akyel et al., 1978) whose performances are well established in giving both rapid and accurate measurements. Indeed, a phase lock loop ensures an almost immediate recognition of the resonance frequency so it allows a

continuous monitoring of its value and, consequently, also the real part of the complex permittivity. Moreover, forcing the radiation source frequency to track the resonance value can yield further advantages, as it has been precedently demonstrated by some of the authors; indeed it permits the determination of the imaginary part of the complex permittivity directly from the measurement of the voltage standing-wave ratio (VSWR) at the cavity input under resonance conditions. The new measurement procedure detailed by Gallone et al (1996) explains why and how such methods can be automated and assure reliability to be used for field measurements.

The microwave power is usually supplied by the frequency *synthesizer*. It provides a narrow frequency sweep which crosses the resonance point. The frequency extremes of the sweep can be rapidly and smartly adjusted in order to follow the migration of the cavity resonance. Time resolution and frequency range must be chosen according to the process to be monitored, therefore determining the type of microwave source, power detector and cavity shape and size.

The following sections briefly describe the electronics and essentials of the measuring equipment developed. It is designed to operate on the same lines as the network analyzer however the CPT is the main focus. This limits the choice of wide frequency sweeps and ranges. The present measuring system is aimed at measuring the dielectric properties of agri-food materials for further microwave / RF processing applications.

MATERIALS AND METHODS

Cavity (915, 2450 MHz)

The permittivity measurement is based on the perturbation technique and uses a cavity operating in standard TM_{010} mode (ASTM, 1986). The material used for cavities are copper (915 MHz) and brass (2450 MHz), respectively, with high thermal conductivity, low electrical loss and strongly recommended for such measuring systems (Gauthier, 1997). These circular cavities were connected to an external constant, recirculating type temperature control bath (Fischer Scientific, ISOTEMP 1013S) permitting the dielectric properties measurement at various temperature ranges (-30 to 200°C). TM_{010} mode was chosen for its simplicity in mathematics and symmetry. The design and fabrication of the resonant cavities have been reported elsewhere (ASTM, 1986). The excitation of the microwave signal and the coupling was achieved using standard antenna loop for magnetic coupling purposes. Proper tuning of the antenna was necessary to minimize the loss in the coupling and to obtain the maximum Q at the empty cavity. Standard adaptors and cables were used to connect various components and external computer.

Permittivity Analyzer (PA) : *components and functions*

The new permittivity analyzer developed to determine the dielectric properties of material under test (MUT) essentially consists of a resonant cavity at 915 MHz and 2450 MHz, and a *permittivity analyzer* which consists of two microwave synthesizers (915, 2450 MHz), a micro-controller, a detector, and an analog-to-digital converter (ADC). These synthesizers are in fact the programmable microwave generator operating in a frequency ranges: 600 to 1200 MHz and 2200 to 2500 MHz. It

is programmable by incremental steps of 20 kHz frequency, thus giving the possibility of 50,000 and 12,000 points in the range of interest, respectively. A micro-controller is needed in this analyzer to manage all signal coming from PC to control the synthesizer and ADC. In order to reduce the reaction time the software starts with a wide sweep in the selected band, and once the resonant frequency has been found, the analyzer will focus to this point and perform an accurate measurement at that point. The number of points can be as high as 800 in this small portion of spectrum.

At the output of the cavity the power is measured using a *zero-bias diode*. The voltage of the diode is a function of the power of the received signal. A calibration curve is stored by the software to translate this voltage to power. The voltage measurement is made by a 16-bit ADC. For each voltage measurement, signal is converted and returned to the computer through the serial port. Hence, a complete permittivity analysis can be carried within 10 seconds or even less.

This equipment can be connected to an IBM compatible PC 386 or higher computer through a RS232 cable to a serial port. A software is developed to control the analyzer functions and compute the complex permittivity of the Material Under Test (MUT).

Description of the functional block

The whole measuring system consists of a permittivity analyzer, computer (PC) and a cavity. The analyzer is connected to the computer through a serial port. It mainly comprises of a microcontroller, synthesizer, filter, detector, ADC (16 bit) and a cavity.

Microwave Synthesizers
Two synthesizers are installed in the equipment. For 915 MHz band the synthesizer can sweep from 600 to 1200 GHz and for 2450 MHz band, it can sweep from 2200 and 2500 MHz. The LMX 2325 (National Semiconductor Corporation, 1996) is a high performance frequency synthesizer with integrated prescaler designed for operation up to 2.5 GHz. Using a proprietary digital phase locked loop technique, this synthesizer can generate very stable, low phase noise signals to perform permittivity analysis.

The output of the voltage control oscillator (VCO) is in the range of 2.2 to 2.5 GHz. The output of phase comparator change the voltage of VCO input to tune it to the right frequency. As a result of this, the control voltage will change and the system tracks and locks when both signals have attained the same frequency. This feature of the VCO is critical in the overall performance of the analyzer. At the output of VCO, two signals are present; the fundamental of 2.45 GHz and the second harmonic. A low pass filter is connected at the output of VCO to eliminate the second harmonics. Similar configuration is designed at lower band; 600 to 1200 MHz for the 915 MHz system.

Detector
The power detection is made by using a Schottky diode. This zero bias diode rectifies the RF signal. A 50 S resistor is connected in parallel to the input to match it. The output voltage is function of the input power.

ADC : Analog to Digital Converter

An ADC is used to translate the voltage to bits. The resolution of this ADC is 16 bit. The input signal of ADC is K2 = 4 volts and the output of the detector is only 200 mV. Therefore, an amplifier was added with a logarithmic gain to perform permittivity analysis. The function gain of the amplifier allowed a higher gain at low power and a lower gain at high power. The minimum microwave signal we can read with this system is - 40 dbm. And the maximum is 0 dBm. The total dynamic range of our system is 40 dB.

Microcontroller

The microcontroller is very similar to a small computer. It has a 32 byte RAM, EEPROM (hard disk) of 2 k bytes, and 16 input / output ports, programmable in serial. The purpose of this microcontroller is to interface data between the computer and different circuits of the analyzer. The microcontroller receives data coming from serial port of computer program and addresses the synthesizer and reads ADC. Then, it sends back the binary values of the ADC reading to computer.

Control software

The main control program is written in Visual Basic 5.0 language. This program first allowed to make a sweep in frequency to find roughly the value of resonant frequency. After the initial sweep, it zooms further at this point with a maximum resolution of 20 kHz and a curve of resonant frequency and power is plotted. Subsequently, it searches the maximum and -3db point. The calibration curve for detector is included in the main program. A frequency sweep is made at the input of cavity and the power is read at the output and subsequently, a curve of transmitted power vs. frequency can be plotted to find the resonant frequency. With the help of a computer program, the value of the maximum resonant frequency can be found from this information. At the same time, with a calibrated output detector, we can find the Q factor of the cavity at -3 dB points.

To make the measurement of a sample we need to calibrate the system. For the calibration we make a measurement without sample to find the f_o, Q_o. Then program stores this value in memory. To make the measurement of sample, we introduce the sample inside the cavity and start a sweep. Then with the new value of Q_s and f_s, we can compute using the perturbation theory, the complex permittivity.

PRELIMINARY RESULTS

Table I shows the values of dielectric properties of standard solvents and chemical reagents commonly used in the microwave enhanced chemistry applications and calibration materials. The values represent the average of 3 readings measured using cavity perturbation technique at 2.45 GHz, temperature = 24°C. They are in good agreement with the reported values (Kingston & Haswell, 1997). The cavity for 915 MHz has been designed and developed and at this stage the evaluation of the system in under progress. **Table II** shows the variation in Q-factor for some standard solvent and chemical reagents. This indicates the heat dissipation qualities, i.e., methanol (ε'' =13.92) heats faster than acetone (ε'' = 0.93) or toluene (ε'' =0.01). In general, the lower the Q , higher the heating rate. **Table III** represents the numerical values of ε' and ε'' of selected agri-food materials (solids, semi-solids, particulates and liquids) determined under conditions as described above. The values obtained

by measuring using the new permittivity analyzer is found to agree with the reported values (Giroux, 1987). This relationship may be quite useful for any microwave enhanced chemical reactions or design of an applicator. Energy distribution and flow within a cavity can be investigated and modeled using Q-factor values for different modes of configurations (TM / TE).

Developments to the PA

Research and developmental aspects concerning this analyzer may be accomplished by adding additional frequency options and amplifying the microwave power output to measure high loss materials. More the components, more is the cost. It is recommended that the design elements be planned and implemented based on the user's needs and budget constraints.

Purpose of an amplifier / attenuators

Provision is made to connect a 20 dBm amplifier at the output port of the permittivity analyzer. The purpose of this amplifier is to increase the power level into the cavity. The size of the sample is very small and just a fraction of watt is enough to heat up this sample. At same time by adding amplifier the gain of total chain is higher. More gain is necessary if we want to measure high loss material. By this way the dynamic range of equipment is better by this gain factor. By using amplifier to make measurement with low loss material, we can expect a saturation of detector, because the microwave energy is not absorbed by the sample and all the power flow to the detector. To prevent this problem we need to add attenuator at the input of the detector. Typically the maximum power we can inject at the input of the detector is 0 dBm and the minimum power is -40 dBm. Without amplifier the dynamic range of analyzer is 40 dB. By using the amplifier properly we can increase the dynamic range of analyser by the factor of the gain of the amplifier. Without sample the attenuation of cavity is in the range of 12 to 15 dB (empty cavity) and with a high loss material the attenuation in the cavity go up to 40 to 60 dB. By using an amplifier the gain of the amplifier is used to reduce the attenuation in the cavity for high loss material.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

The permittivity analyzer is simple, easy and flexible to operate. It is presently under developmental stage and has a promising potential to function as an excellent investigative tool in the microwave measurement and sensing aspects. It is less expensive and portable compared to the commercially available network analyzers. Detailed cost analysis is not carried out at this time, however is needed to fully justify the benefits of the permittivity analyzer. Cavity perturbation technique is found to be more reliable measuring system in terms of accuracy, high temperature capability and low loss measurements. The disadvantages of this system include; difficulty in measuring bulk and high lossy samples, limited frequency sweeps and limited modes of cavity configuration . The method presented here might be useful for fast and accurate measurements in both static and dynamic applications. **Figure 1** shows a standard peak resonance frequency curve for water sample at 2.45 GHz. The apparatus such as this (permittivity analyzer) has a potential to perform number of laboratory / field tasks such as monitoring of polymerization, microwave heating rate, moisture content, density, biological & biomedical diagnostics, etc at two major frequencies (915 and 2450 MHz, variable

temperature range). Its rapid response makes it very useful in those applications where a rapid acquisition is an essential requirement as in measuring some characteristics of a flowing sample. In addition, this setup can be easily improved and adapted to many other applications, and both commercial and custom built devices can be used. The control software has been developed and moduled using Visual basic environment.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge the financial support of the Natural Sciences and Engineering Council of Canada (NSERC) and the Fonds pour la formation de Chercheurs Aide à la Recherche du Québec (FCAR).

REFERENCES

Akyel, C., Bosisio, R., and April, G.E. 1978. An active frequency technique for precise measurements on dynamic microwave cavity perturbations. *IEEE Transaction* on IM 27:363-368.

Altschuler, H.M. 1963. Dielectric constant. *Handbook of Microwave Measurements* (M. Sucher & J. Fox, eds.). Brooklyn Polytechnic Press, New York, NY. vol. 2:530-536.

ASTM (American Society for Testing and Materials).1986. *Standard test methods for complex permittivity (dielectric constant)*. Designation D 2520-86, Method B (resonant cavities).

Butta, E., Livi, A., Levita, G., and Rolla, P.A. 1995. Dielectric analysis of an epoxy resin during cross-linking. J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 33:2253-2261.

Cocco, M. 1990. La misura dielettrica del termine diinterazione nei processi di assorbimento. *Thesis on Physics*, University of Pisa, Italy.

Gallone, G., Lucardesi, P., Martinelli, M., and Rolla, P.A. 1996. A fast and precise method for the measurement of dielectric permittivity at microwave frequencies. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol.31, No.3: pp158-164.

Gauthier, J. Personal communications. 1997-98. GauTel™, Montreal, Canada.

Giroux, M. 1987. Dielectric properties at standard microwave and radio frequencies. *A C.D.T. project report*. Ecole polytechnique de Montreal.

Kingston, H.M and Haswell, S.J. 1997. Microwave enhanced chemistry - fundamentals, sample preparation and applications. American Chemical Society, Washington, DC.

Kraszewski, A. 1996. Microwave Aquametry - electromagnetic interaction with water containing materials. *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, New York, NY 10017-2394.

Montgomery, C.G. 1947. Technique of Microwave measurements. McGraw-Hill, New York, NY, 340.

Nelson, S.O., and Kraszewski, A.W. 1990. Grain moisture content determination by microwave measurements. *Transactions of ASAE*; 33(4):1303-7.

Ney, M and Gardiol, F. 1977. Automatic monitor for microwave resonators. IEEE Trans. on IM 26:10-13.

Okamura, S., Miyagaki, S. and Ma, A. 1998. Accurate resonance frequency detection in a microwave moisture measurement. *J. Microwave Power and EM Energy*, 33(3):143-150.

Sun, E., Datta, A, and Lobo,S. 1995. Composition-Based prediction of dielectric properties of foods. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*; 30(4):205-212.

Technical information sources National Semiconductor Corporation,1996.U.S.A.

Venkatesh, M.S. 1996. Cavity perturbation technique for measurement of dielectric properties of some agri-food materials (*M.Sc. thesis*). McGill University, Macdonald Campus, Canada.

Table I. Dielectric properties of some standard solvent and chemical reagents.

Sample	ε'	ε»
Starch -H_2O solution	81.3	10.36
Dist. Water	78.5	12.57
DMF	38.5	5.35
Methanol	23.1	13.92
Acetone	21.9	0.93
Methyl ethyl ketone	19.2	1.19
Ethanol	7.19	7.24
Ethyl acetate	6.75	0.25
n-amyl alcohol	3.05	1.51
Toluene	2.83	0.01
Fumaric acid	2.37	0.006
Hexane	2.01	0.009
Dimethyl fumarate	1.93	0.12
Petroleum ether	1.84	0

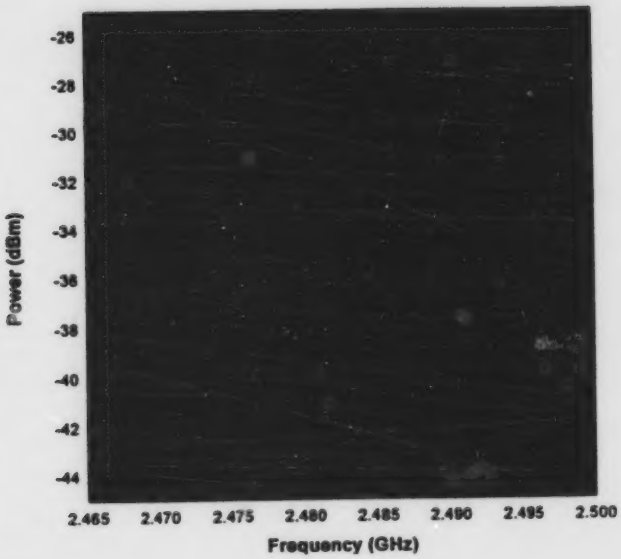


Figure 1. Typical peak resonant frequency curve for water sample at 2.45 Ghz

Table II. Cavity Q-factor of selected solvent and chemical reagents.

Sample	Q_{empty}	Q_{sample}
Methanol	5096	348
Dist. Water	5096	457
Ethanol	5096	629
Methyl ethyl ketone	5096	2327
Acetone	5096	2659
Toluene	5096	5021

Table III. Dielectric properties of some agri-food materials.

Sample	ε'	ε»
Solid		
Teflon	2.74	0.0003
Borosilicate glass (corning)	4.65	0.008
Semi-solid		
Wax (plastic)	2.01	0.007
Particulates		
Clay soil (12% m.c.)	2.44	0.14
Loamy soil (7% m.c.)	7.01	0.05
Grape seed powder - (freeze dried)	3.57	0.26
Edible Oils		
Corn oil	2.59	0.13
Sunflower oil	2.51	0.18

ÉLABORATION ET MISE AU POINT D'UN NOUVEAU CONCEPT D'EMBALLAGE ALIMENTAIRE CONTRÔLE DE LA PERMÉABILITÉ À L'EAU, AUX GAZ ET AUX COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS

Imane Lahlou[1] et Jean-Pierre Émond[2]

[1]Département des sciences de l'alimentation et nutrition, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4
[2]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4 < jean-pierre.emond@grr.ulaval.ca >

INTRODUCTION

La plupart des produits alimentaires disponibles sur le marché, sont voués soit en cours de développement soit en cours de distribution, à entrer en contact avec un emballage qui doit répondre à des critères particuliers. Suivant la composition de l'aliment (Ex. riche en acides gras insaturés), le procédé technologique (Ex. stérilisation), le mode de conservation (Ex. réfrigération) et les habitudes alimentaires du consommateur, etc., le choix de l'emballage est différent et nécessite une étude scientifique approfondie. Si l'industrie de l'emballage et du conditionnement offre aujourd'hui une large gamme de matériaux, de fonctions, de formes, etc., elle se caractérise surtout par les prodigieux progrès réalisés dans le secteur des matières plastiques. En plus de leurs qualités fonctionnelles (résistance à la traction, élasticité, souplesse ou rigidité, transparence, thermorétractabilité, et inertie chimique élevée), les matières plastiques se distinguent par leur faible rapport poids/volume et leurs prix compétitifs et constituent ainsi une classe de matériaux d'emballage exceptionnelle. Cependant, à la différence du verre et du métal, les matières plastiques présentent toujours un certain degré de perméabilité à la vapeur d'eau, aux gaz, et aux composés organiques volatils. Pour limiter les modifications inhérentes aux phénomènes de transferts de masse entre le contenant, le contenu et l'environnement, le projet « film in a mold » propose l'élaboration et la mise au point d'un emballage alimentaire comprenant des films barrières, qui confèrent l'imperméabilité aux gaz, à la vapeur d'eau et aux composés organiques, et un matériau support qui apporte la résistance mécanique au contenant.

LE CONTENANT "FILM IN A MOLD"

Technologies mises en œuvre

Le contenant comprend un matériau barrière, qui confère l'imperméabilité aux gaz, à la vapeur et aux arômes et un matériau support, qui apporte la résistance mécanique. Deux technologies sont mises en oeuvre : contenant en plastique injecté et structure multicouches.

Choix des polymères

Pour obtenir des caractéristiques spécifiques et pour mieux répondre aux attentes des industriels et des consommateurs, il est intéressant d'associer plusieurs polymères. La structure multicouches permet donc de cumuler les propriétés de différents films plastiques. L'objectif

ultime étant de développer un emballage qui permet de minimiser les échanges entre l'aliment et l'environnement, la structure multicouches doit idéalement se présenter comme suit :

- Le polymère au contact de l'aliment (Inside) doit être résistant aux variations de température, humidité et pH, aux corps gras, aux alcools et aux migrations d'arômes.

- Le polymère barrière à l'oxygène, le EVOH, est trappé entre deux films en raison de sa haute sensibilité à l'humidité.

- Le polymère au contact de l'environnement (outside) doit être résistant aux variations de température et d'humidité et à la migration des odeurs extérieures.

La littérature associée aux informations disponibles chez les fournisseurs a permis d'établir une base de données afin de sélectionner les polymères se rapprochant le plus des composantes de la strucure multicouches idéale. Cette étude a permis de mettre en évidence cinq combinaisons possibles. Parmi ces films, certains[1] ont été utilisés pour la conception du contenant « film in a mold ».

Caractéristiques générales
Le contenant « film in a mold » sera un emballage alimentaire :

- Haute barrière à la vapeur d'eau, aux gaz et aux composés organiques volatils
- Résistant aux corps gras, aux acides et aux alcools
- Résistant aux traitements thermiques classiques : congélation, pasteurisation et stérilisation
- Actif : une substance active (antimicrobien, antioxydant, antifongique, etc.) pourra être intégrée au contenant

EMBALLAGE, PERFORMANCE ET PROCÉDURE D'ÉVALUATION

Afin de déterminer (voire prédire) les caractéristiques d'une structure multicouches, il est important d'établir une stratégie expérimentale permettant de définir précisément les propriétés des différents polymères mis en jeu. Le protocole expérimental mis au point dans le cadre du projet « film in a mold », peut être appliqué aussi bien aux films plastiques qu'aux contenants rigides.

[1] Pour des raisons de confidentialité, les composantes du contenant "film in a mold" ne peuvent être révélées.

Les principaux volets

L'objectif principal du protocole expérimental consiste à déterminer pour chaque film étudié les propriétés suivantes :

Perméabilité à l'oxygène
Perméabilité aux arômes
Absorption d'eau
Résistance aux acides
Résistance aux alcools
Résistance aux corps gras
Influence des traitements thermiques

Détermination de la perméabilité à l'oxygène

L 'appareil utilisé est le MOCON OX-TRAN 2/60. Le principe du Mocon repose sur la méthode coulométrique. Celle-ci est régie par la loi de Farraday, selon laquelle chaque molécule d'oxygène libére 4 électrons qui passent à travers une résistance et forment alors un courant électrique (loi d'Ohm) qui est directement corrélé à la quantité d'oxygène ayant traversé le film. Le taux de transmission de l'oxygène (OTR) est exprimé en cc/m^2/jour ou en $cc/100in^2$/jour. La perméabilité des films à l'oxygène sera déterminée en fonction de l'épaisseur du film (outside/barrier/inside), de la température (5-85°C) et de l'humidité (0 à 98%)

Détermination du taux d'absorption d'eau et perte de soluté

La norme ASTM D570-95 permet de déterminer le taux d'absorption d'eau et la migration des solutés du film vers la phase aqueuse. Il est important de noter que la perte de solutés peut être quantifiée mais la nature des composés ne peut être définie par cette méthode.

Étude de la résistance aux acides et aux alcools

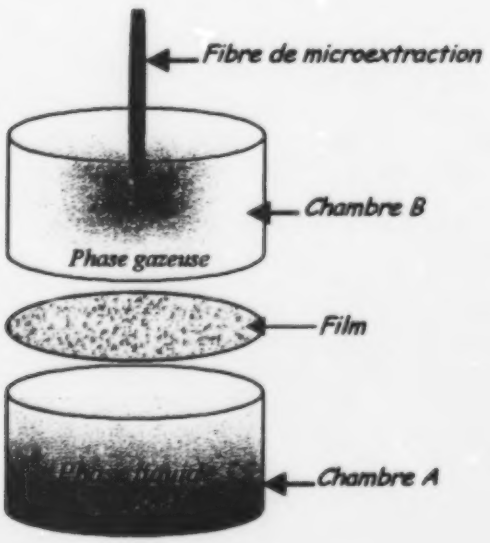
La norme ASTM F119-82 a permis d'établir le protocole expérimental relatif à l'étude de la résistance aux acides et aux alcools. Ce test permet d'évaluer la résistance aux agents chimiques de tous les matériaux plastiques. Ces agents standards peuvent être utilisés comme des simulateurs alimentaires (produits acides et produits alcooliques). Le type de conditionnement (immersion ou patch mouillé) dépend de l'utilisation finale du matériau. Si celui-ci est utilisé comme récipient, les échantillons doivent être testés en immersion. La méthode des patchs imbibés est conseillée dans le cas où le matériau est soumis à de courtes expositions ou est à proximité d'agents chimiques (risque d'éclaboussures). Dans le cadre de l'étude des interactions aliments-emballage, le test par immersion est plus approprié.

Le choix du type d'agent chimique et sa concentration sont imposés par la norme. En revanche le temps d'immersion et la température peuvent être adaptés selon les cas. Ces conditions expérimentales fournissent une base à la standardisation et servent de guide aux chercheurs qui souhaitent comparer la résistance relative de différents plastiques à des agents chimiques

typiques. Il est important de noter que la norme a été adaptée en fonction du matériel disponible au laboratoire.

Détermination de la perméabilité aux arômes

La chromatographie en phase gazeuse associée à la technique de microextraction permet de déterminer la perméabilité aux arômes des films étudiés. Une cellule de perméabilité a été conçue pour les besoins spécifiques du projet. Elle est constituée de deux chambres séparées par le film ou l'emballage à tester. La première chambre (A) contient la solution d'arôme. Les molécules d'arôme pouvant traverser le film ou l'emballage sont piégées dans la seconde chambre (B) et captées par une fibre de microextraction. La méthode de microextraction en phase solide (SPME) ne requiert pas l'utilisation de solvant ou d'appareil complexe. Elle peut être utilisée pour concentrer des produits volatils à partir d'une phase liquide ou gazeuse. La technique SPME permet de capturer les arômes -à partir de la chambre B de la cellule de perméabilité- à l'aide d'une unité composée d'une fibre en silice sur laquelle repose la phase stationnaire en polymethylsiloxane (PDMS). Il est important de noter que la fibre, fixée à un support de protection, peut être directement introduite dans l'injecteur du GC.



Étude de la résistance aux corps gras

La norme ASTM F119-82 a permis d'établir le protocole expérimental relatif à l'étude de la résistance des polymères aux corps gras. Ce test consiste à exposer les films (une des facettes seulement) à des patchs en coton imbibés d'huile d'olive à la température désirée (50°C).

Procédure d'évaluation et performance

Le protocole expérimental décrit précedemment permet de déterminer les relations entre les caractéristiques des films barrières, les composés alimentaires en contact et les traitements thermiques. A partir de ces données, des modèles de prédiction de la perméabilité d'un contenant type seront élaborés. Le projet «film in a mold» fournira aux industriels des outils de sélection

précis en tenant compte de la composition du produit à emballer, les procédés de fabrication, le mode de conservation et la durée de vie de l'aliment.

CONCLUSION

La conception du contenant « film in a mold » résulte d'une étude approfondie des différents paramètres qui régissent le système aliment/emballage/environnement en tenant compte des contraintes technologiques et économiques. Les technologies de mise en oeuvre du contenant « film in a mold » associées au choix judicieux des polymères composant la structure multicouches, confèrent à l'emballage une étanchéité parfaite, une résistance aux corps gras, aux alcools et aux aliments acides ainsi que d'excellentes propriétés barrières aux gaz et aux composés organiques volatils. De plus, suivant la composition du produit à conserver, une substance active pourra être intégrée au film barrière ou diffusée via un système de libération contrôlée. Enfin, la conception de ce contenant doit tenir compte des coûts de production puisque le projet « film in a mold » cible une large gamme de produits alimentaires.

SÉLECTION D'UN EMBALLAGE POUR LE TRANSPORT DES PRODUITS CARNÉS FRAIS DANS LE GRAND NORD

Frank Ah-Waye, Damien De Halleux et J.P. Émond

Département des sols et de génie agroalimentaire,
Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4
< ahwayefrank@yahoo.com >, < damien.de.halleux@sga.ulaval.ca >

RÉSUMÉ :

Peu de viandes fraîches sont envoyées actuellement au Grand Nord à cause des pertes qui y sont associées. Ces pertes s'expliquent par un bris de la chaîne du froid durant tout le processus de transport, un emballage inapproprié de la viande, un entreposage non adapté au cours de l'envoi et à l'incertitude météorologique qui peut retarder la livraison de la marchandise. Tous ces facteurs accélèrent la détérioration de la viande fraîche. En outre, la viande est, de par sa nature, un milieu très riche en nutriments et permet donc le développement et la prolifération bactérienne. Afin d'éviter ces fluctuations de températures, plusieurs emballages seront testés pour leur efficacité. On envisagera également l'utilisation d'atmosphère modifiée afin de contrer le développement de la flore bactérienne responsable de la dégradation des viandes. Ainsi, l'hypothèse que le développement d'un emballage pourrait prolonger la durée de conservation des coupes de viandes fraîches durant leur transport vers les Territoires Inuits a été retenue.

Pour cela, trois objectifs ont été établis :

- Identifier et sélectionner un emballage approprié qui résiste aux fluctuations de température, hiver comme été, durant toute la durée du transport ainsi qu'améliorer le système de transport actuel
- Prolonger la durée de conservation des viandes fraîches sous atmosphère modifiée
- Prédire la population bactérienne grâce à des modèles mathématiques préétablis en fonction des conditions de transport.

La méthodologie consiste à recréer les conditions atmosphériques (obtenues par des tests préliminaires sur le terrain) que subit la viande fraîche, préalablement emballée sous atmosphère modifiée, au cours de l'envoi dans un laboratoire et de mesurer les performances de plusieurs types d'emballage dans cet environnement contrôlé. Des simulations sur la viande fraîche seront également effectuées afin de comparer les prédictions mathématiques et réelles. La viande fraîche sera évaluée du point de vue microbiologique et sensorielle. Enfin, une expérience sur le terrain sera effectuée suite à la sélection judicieuse de l'emballage.

EFFET DE LA DURÉE DU PRÉREFROIDISSEMENT SOUS VIDE SUR LA CONSERVATION DE LA QUALITÉ DE LA LAITUE

Timothy J. Rennie[1], Clément Vigneault[1] et G.S. Vijaya Raghavan[2]

[1] Centre de recherche et de développement en horticulture, 430 Gouin, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6, < vigneaultc@em.agr.ca >

[2] Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9, < Raghavan@macdonald.mcgill.ca >

RÉSUMÉ :

Le refroidissement rapide (ou prérefroidissement) est une méthode qui permet d'augmenter la durée d'entreposage des produits frais en retirant rapidement la chaleur qu'ils ont accumulée au champ. Le prérefroidissement sous vide est une méthode particulièrement bien adaptée pour refroidir les légumes dont le rapport surface totale/masse est très élevé, telle la laitue. L'inconvénient majeur du refroidissement sous vide est le coût d'achat et d'installation de l'équipement. Des croyances populaires véhiculaient l'idée que seul un abaissement très rapide de la pression autour des produits permettait d'obtenir un refroidissement plus uniforme. L'objectif principal du présent projet était de vérifier l'effet de la durée du traitement sur la qualité de la laitue. De plus, ce projet visait à établir les limites d'opération en terme de durée maximale pouvant être accordée à la mise sous vide de la chambre.

Les résultats obtenus démontrent qu'un système de refroidissement sous vide plus lent est aussi performant et pourrait permettre de concevoir des systèmes plus lents mais aussi beaucoup moins dispendieux pour les producteurs de petites et moyennes tailles.

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE CONTRÔLE AVANCÉ POUR L'ENTREPOSAGE EN ATMOSPHÈRE CONTRÔLÉE

Naro Roxane Markarian, Clément Vigneault et Yvan Gariépy

Centre de recherche et de développement en horticulture, 430 Gouin,
Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6 < vigneaultc@em.agr.ca >

RÉSUMÉ :

L'entreposage en atmosphère contrôlée (AC) est utilisé par de nombreux producteurs au Québec et ailleurs au monde. Ce type d'entreposage a démontré ses capacités à prolonger la conservation de certains fruits et légumes, comme la pomme. L'entreposage AC consiste à maintenir le niveau d'O_2 et de CO_2 dans l'entrepôt à un niveau favorable pour le produit entreposé. Depuis quelques années, on voit apparaître au Québec des systèmes de contrôle automatisés pour augmenter la précision des contrôles et diminuer les besoins de surveillance. Cependant, ces systèmes sont limités parce qu'ils négligent de considérer les changements physiologiques des produits qui surviennent en cours d'entreposage. Il y a donc place à une amélioration de la performance de ces systèmes.

Un système de contrôle avancé a été développé. Le logiciel de contrôle tient compte des changements physiologiques des produits entreposés en réajustant les paramètres de contrôle pour maintenir les conditions environnementales aux niveaux désirés. Des chambres à échelle de laboratoire, représentatives des entrepôts AC commerciaux, ont été construites et mises à l'essai pour évaluer la performance du logiciel. Le système a été évalué sur 42 mini-chambres AC avec différents produits. Les tests démontrent que les performances de ce nouveau système pour fournir l'environnement désiré sont de très haute précision. Un autre atout de ce système est qu'après une panne d'électricité, il peut reprendre la mise en régime des mini-chambres, sans intervention extérieure.

Finalement, le logiciel de contrôle peut recueillir des informations qui permettent de déterminer les caractéristiques des produits entreposés. Ceci peut servir d'outil de recherche très important en physiologie, spécialement pour déterminer les caractéristiques de nouveaux produits.

ASAE ¼ SCALE TRACTOR DESIGN COMPETITION

Alexandre Alary[1] et Philippe Nieuwenhof[2]

[1]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4 < aalary@grr.ulaval.ca >
[2]Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Campus Macdonald, Université McGill, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X3V9 < pnieuw@po-box.mcgill.ca >

RÉSUMÉ :

L'American Society of Agricultural Engineers (ASAE) organise une compétition de mini-tracteurs à l'intention des étudiant(e)s en génie agricole inscrits dans les différentes universités nord-américaines.

Il s'agit de concevoir et de fabriquer un tracteur à deux roues motrices à partir d'un moteur (16 HP) et de pneus arrières (26-12-12) identiques pour toutes les équipes. Les concurrents participent par la suite à une compétition de tirs où les performances des différents tracteurs sont évaluées. Un jury est également chargé d'évaluer la conception et la fabrication des tracteurs selon différents critères techniques. Les équipes doivent aussi produire un rapport technique, un rapport économique ainsi qu'une présentation orale.

L'ASAE a mis sur pied cette compétition pour donner suite à certaines recommandations de l'industrie concernant le manque d'expérience des jeunes gradués. Donc, le but premier de cette compétition est de permettre aux étudiant(e)s d'acquérir une expérience pratique reliée au domaine du génie agricole. La compétition aura lieu à East Moline en Illinois du 1er au 3 juin 2001. En mai 2000, 25 équipes américaines et 3 équipes canadiennes ont participé à la compétition dont l'équipe *UL trac* de l'Université Laval et *The McGill Pulling Team* de l'Université McGill.

En résumé, la compétition prépare les participants à leur rôle d'ingénieur tout en fournissant une expérience pertinente et très enrichissante.

21 mars 2001
15h40 à 17h00

Thème 7 : Mécanisation agricole

Modérateur : B. Panneton

RÉCUPAIR, NOUVELLE APPROCHE POUR LA PULVÉRISATION D'ARBRES FRUITIERS.

Roger Thériault[1], Bernard Panneton[2] et Benoit Lacasse[2]

[1]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval,
Ste-Foy, Québec, G1K 7P4
[2]Centre de recherche et de développement en horticulture, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 430 Boul. Gouin, St-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6 <pannetonb@em.agr.ca>

RÉSUMÉ :

En verger de pommier, l'efficacité de l'utilisation des pesticides est tributaire de la technique d'application. Il a été estimé que lors d'une pulvérisation conventionnelle effectuée alors que le développement des feuilles est complet, 55% de la bouillie se retrouve sur le feuillage. Le reste, 45%, se retrouve sur le sol (25%) ou est dispersé dans l'air sous forme de dérives (20%) (Fox 1998). Il est clair que cette situation doit être améliorée. C'est l'objectif du projet *RÉCUPAIR* (en instance de brevet) qui vise le développement d'un pulvérisateur à verger qui permet de réduire la dérive et les pertes au sol grâce d'une part, à un système de distribution de la bouillie qui est efficace et d'autre part, à un système de récupération qui permet d'intercepter la bouillie qui serait perdue au sol ou dans l'air.

PREMIER PROTOTYPE

Un premier prototype a été construit au CRDH à St-Jean-sur-Richelieu (Fig. 1). Ses dimensions (Fig. 2) conviennent pour les vergers d'arbres nains ou semi-nains. Ce prototype n'a pas été conçu comme une machine commerciale mais comme un banc d'essai pour valider l'approche. Il reste que ce prototype a été utilisé avec succès pendant une saison complète dans un verger commercial.

Deux éléments principaux sont au cœur du concept. Le premier élément est constitué d'une structure supportée en porte-à-faux au-dessus des arbres pour acheminer l'air et la bouillie vers une partie verticale du côté opposé au tracteur. Cette partie verticale supporte un manchon qui distribue l'air uniformément sur toute la hauteur pour créer un rideau d'air parallèle au sol. La bouillie est pulvérisée par des buses à jet conique conventionnelles et disposées le long de la sortie d'air. L'utilisation d'un rideau d'air horizontal a deux avantages :

1. Réduction de la dérive puisqu'il n'y a plus d'air et de gouttes projetés vers le haut qui se retrouvent au-dessus des arbres là où les vents sont plus intenses;
2. Meilleures possibilités pour l'ajustement de l'intensité du jet d'air selon la hauteur dans le but de pousser plus d'air là où le feuillage est plus dense et l'envergure des arbres est maximale.

Le deuxième élément est le panneau vertical fixé au châssis du pulvérisateur servant à la récupération des gouttes. Ce panneau a trois sections (Fig. 3). Le panneau avant est légèrement incliné vers la rangée d'arbres. Cela a pour effet d'éloigner le courant d'air du tracteur. La bouillie récupérée s'écoule par gravité vers le bas des panneaux où elle est recueillie à l'aide de gouttières

et pompée dans un réservoir secondaire. La bouillie peut aussi être pompée vers le réservoir principal pour être utilisée à nouveau.

Figure 1. Vue générale du prototype RÉCUPAIR.

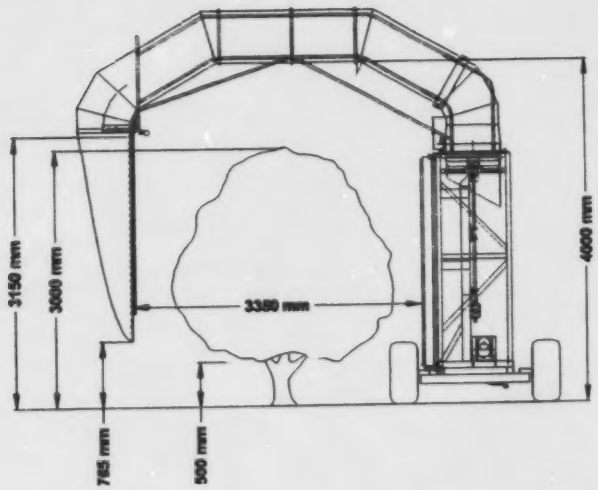


Figure 2. Dimensions générales du prototype.

Figure 3. Panneaux de récupération.

ÉVALUATION DU PREMIER PROTOTYPE

Des essais ont été réalisés dans un verger commercial (Ferme Au Pic Enr., Dunham). Des blocs de verger ont été traités pendant toute la saison à l'aide du prototype et les résultats ont été comparés à ceux obtenus à l'aide d'un pulvérisateur conventionnel (Nobili 90-1500T, Series 2000).

Récupération

L'efficacité de la récupération de bouillie a été évaluée plusieurs fois pendant la saison. Lors des traitements avec des insecticides et des fongicides, le volume de bouillie appliqué était de 290 L/ha et le volume de bouillie récupéré a varié entre 26 L/ha (9%) et 46 L/ha (16%). Pour ces traitements, le volume récupéré diminuait à mesure que le feuillage se développait. Lors de l'application de l'huile de dormance, le taux de récupération a été de 26%. Lors de l'application d'un acaricide au début d'août, le taux de récupération a été de 17%. Des essais en laboratoire ont montré que l'efficacité des panneaux de récupération peut être augmentée sensiblement en modifiant le design. De plus, le taux de récupération plus élevé enregistré pour l'application d'acaricide (17% comparé à 9% pour un fongicide appliqué dans des conditions comparables) offre des pistes pour augmenter l'efficacité globale de récupération. Compte tenu de l'expérience et des possibilités d'amélioration, il est raisonnable d'espérer obtenir un taux global de récupération entre 15% et 25% sur toute la saison de production. Cela se traduit en économie de pesticides. Du côté environnemental, la plus grande partie de la bouillie récupérée se retrouverait sur le sol ou serait perdue en dérive de sorte que la diminution de la charge polluante grâce à l'approche *RÉCUPAIR* est considérable.

Traitements

L'efficacité des traitements a été évaluée à cinq reprises: tavelure sur pousses annuelles, tavelure sur fruits à la récolte, acariens en août avant traitement , acariens en août après traitement et dommages par les insectes sur les fruits à la récolte. Dans l'ensemble, les résultats permettent de conclure que les traitements réalisés à l'aide du *RÉCUPAIR* se sont avérés aussi efficaces que ceux effectués avec un pulvérisateur conventionnel. Pour la tavelure, on a noté une incidence légèrement supérieure sur les fruits à la récolte pour la technologie *RÉCUPAIR*. Les données prises sur les pousses annuelles n'ont pas montré de différence mais elles ont permis de noter que les signes d'infection par la tavelure ne se retrouvaient que sur deux feuilles consécutives sur les tiges annuelles, indiquant que l'infection résultait de l'inefficacité d'un seul traitement.

DEUXIÈME PROTOTYPE

Un deuxième prototype (Fig.4) a été construit au Citrus Research and Education Center (CREC) de l'University of Florida à Lake Alfred en vue de valider l'approche pour le traitement des jeunes arbres d'agrumes. Au cours de leurs dix premières années de croissance, les arbres d'agrumes présentent des espaces libres entre eux et ont encore une hauteur inférieure à 3-4 m. Par la suite, ils forment des haies pleines pouvant atteindre 5 à 6 m de hauteur; le concept *RÉCUPAIR* ne convient alors plus.

Les deux éléments principaux au coeur du concept se retrouvent sur ce deuxième prototype. Ses dimensions sont environ du 2/3 de celles du premier prototype, l'unité existante sur laquelle il a été construit ne permettant pas un plus grand dégagement. Les principales différences dans la conception, outre l'absence de réglages en déplacement, sont dans la section d'écoulement de la conduite d'air et dans le design du panneau de récupération de la bouillie.

Le rapport plus faible de la section d'écoulement de la conduite d'air pour un débit d'air équivalent a necessité l'ajout de redresseurs d'air à la sortie de la gaine pour produire un courant d'air proche de l'horizontale en direction du panneau de récupération. Ce panneau est d'une seule section avec un arrangement des ailettes permettant la capture des gouttelettes de bouillie plus efficacement que dans le premier prototype (Fig. 5).

ÉVALUATION DU DEUXIÈME PROTOTYPE

Les essais pour l'évaluation du deuxième prototype ont été réalisés sur le site du CREC. Ils ont porté sur le taux de récupération de la bouillie et sur la distribution des gouttelettes dans le feuillage des arbres.

Récupération

La capacité de récupération a d'abord été évaluée à l'arrêt, en éliminant le plus possible l'effet du vent, pour choisir la configuration de l'appareil et l'arrangement des buses susceptibles de donner les meilleurs résultats en mouvement. Dans ces conditions, les taux de récupération allaient de 46 à 80 %, avec 61 % pour l'arrangement retenu pour les essais en mouvement. L'efficacité de récupération était principalement limitée par les dimensions du panneau et son dégagement au sol.

De plus, la présence d'obstacles aussi bien derrière que devant les ailettes réduisait le taux de récupération.

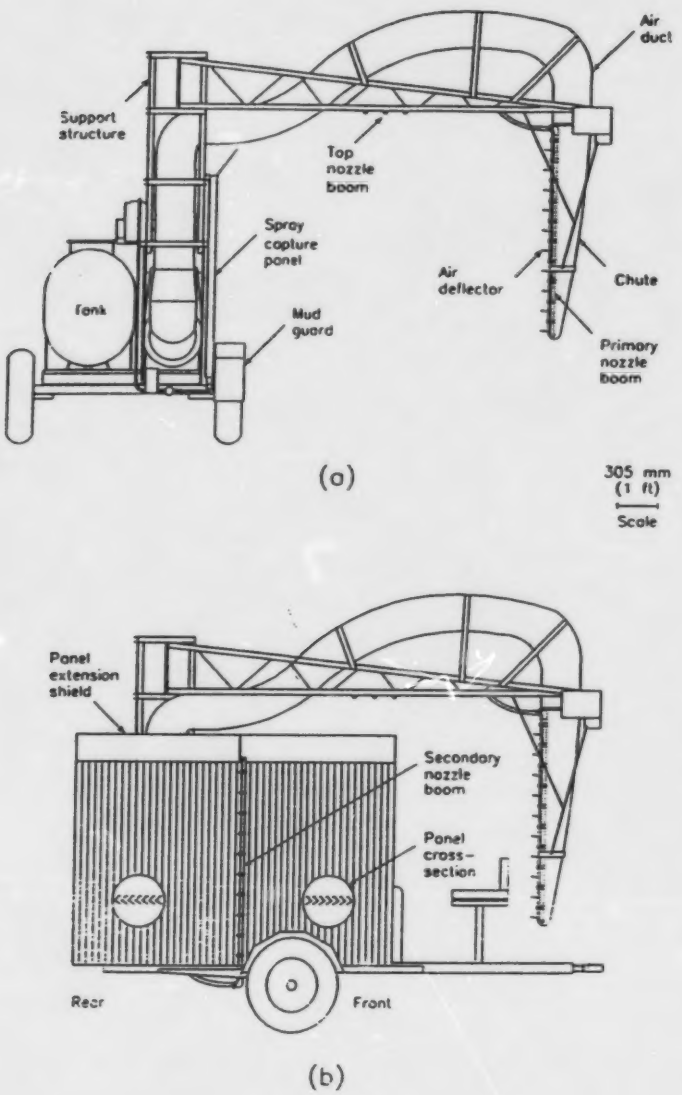


Figure 4. Représentation du deuxième prototype : (a) vue arrière en position de travail, (b) vue latérale en position de transport.

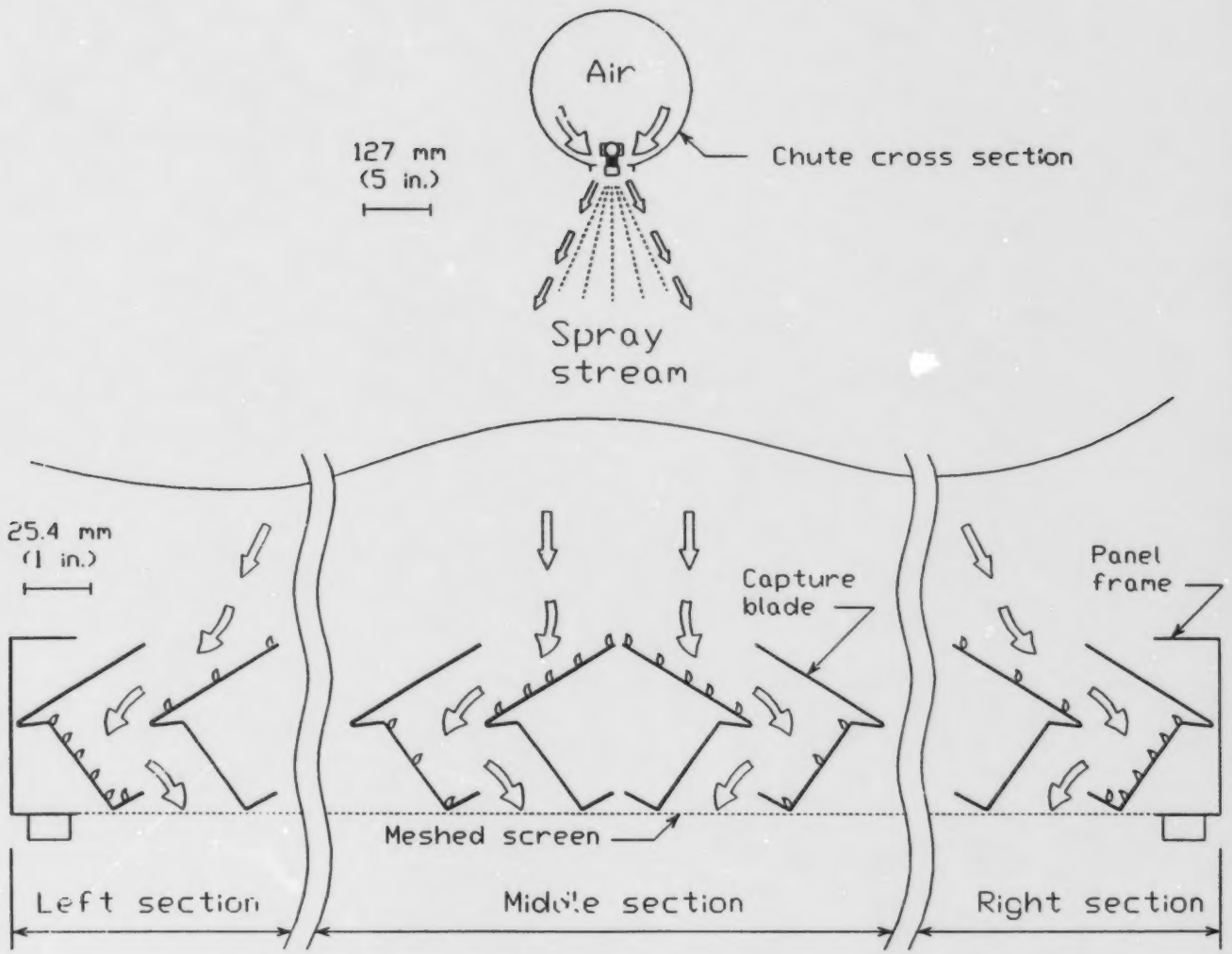


Figure 5. Agrandissement des ailettes de capture avec le trajet de l'air et l'impact des gouttelettes de bouillie sur les ailettes.

En mouvement, la récupération a d'abord été mesurée sans arbres; elle était de 45 % pour un déplacement dans le sens du vent et de 35 % à l'opposé, pour des vitesses de vent (4 à 5 km/h) et de machine (5 km/h) voisines. Avec des arbres présentant plus ou moins d'espaces libres entre eux, la direction du vent avait peu d'influence sur le taux de récupération qui était de 22 à 44 % selon que les espaces libres entre les arbres étaient moins ou plus importants.

Distribution dans le feuillage

L'uniformité de distribution de la bouillie dans le feuillage des arbres a été évaluée à l'aide de cartons hydrosensibles dont la couverture a été quantifiée visuellement et par analyse d'image avec des résultats comparables. L'analyse d'image donne toutefois des valeurs relatives plus proches de la réalité.

La meilleure uniformité de distribution en un seul passage a été obtenue en ajoutant une rampe secondaire devant le panneau de récupération, en complément à la rampe principale placée dans la gaine de distribution d'air et à la buse située au-dessus du centre de l'arbre. Il a par ailleurs été vérifié qu'une meilleure distribution peut être obtenue en deux passages en sens opposés, sans la rampe secondaire. Le choix dépend de l'importance des contraintes de temps liées à la pulvérisation à effectuer.

Aucune différence significative n'a été observée à la verticale, entre le haut et le bas de l'arbre. Par contre, la couverture des feuilles au centre de l'arbre était d'environ la moitié de celle des feuilles situées à l'extérieur de l'arbre.

CONCLUSION

Le projet *RÉCUPAIR* a permis de démontrer que l'approche retenue permet de préserver l'environnement, de sauver des pesticides et de maintenir l'efficacité des traitements. Ces résultats sont excellents et nous encouragent à continuer le développement de cette technologie.

RÉFÉRENCE

Fox R.D. 1998. Air-blast/air-assisted application equipment and drift. *Proceedings of the North American Conference on Pesticide Spray Drift Management*, Portland, MA, March 29- April 1: 108-129.

TEXTES PLUS DÉTAILLÉS

Panneton, B., R. Thériault et B. Lacasse, 2000. RÉCUPAIR, a new approach to orchard, bush and vine spraying. *ASAE Annual International Meeting*, Milwaukee, Paper No. 001117.

Thériault, R., M. Salyani et B. Panneton, 2000. Reduction of pesticide wastage in citrus applications. *ASAE Annual International Meeting*, Milwaukee, Paper No. 001118.

Thériault, R., M. Salyani et B. Panneton, 2000. Development of a sprayer to reduce pesticides wastage in orchard applications. *Florida Section Annual Conference*, Daytona Beach, Paper No. FL2000-12.

DÉVELOPPEMENT D'UNE RÉCOLTEUSE DE CHOUX

Roger Chagnon

Centre de recherche et de développement en horticulture, Agriculture et Agroalimentaire Canada,
430 Boul. Gouin, St-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6
< chagnonr@em.agr.ca >

RÉSUMÉ :

Malgré toutes les innovations de la science moderne, la récolte des choux se fait encore à la main en l'an 2000. La compagnie Univerco Hydraulique (1978) inc. de Napierville et le Centre de R&D en horticulture (CRDH) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) à St-Jean-sur-Richelieu collaborent ensemble pour développer une récolteuse mécanique pour les choux.

Le projet a débuté en août 1999 et se poursuivra jusqu'au printemps 2002. Il est réalisé par une belle équipe formée d'employés d'Univerco : Réjean Dunn, Patrick Ramsay ing. stag., Paul et Mario Bisaillon ainsi que d'employés d'AAC : Sylvain Fortin ing., Jérôme Boutin ing. stag. et Roger Chagnon ing. pour la partie ingénierie et Isabel Lemay et Jennifer DeEll pour l'évaluation de la qualité postrécolte des choux.

Au cours de la dernière année, un prototype a été construit et testé ; c'est un modèle à un rang composé de trois parties principales : le cueilleur, le séparateur de feuilles et le convoyeur d'élévation. Le cueilleur arrache les choux au moyen de deux courroies de type «D» modifiées pour mieux tenir les tiges de choux. Les courroies montent les choux jusqu'à une lame fixe qui coupe les tiges de façon très nette. La hauteur est relativement uniforme d'un chou à l'autre; on peut varier la hauteur de la lame pour laisser plus ou moins de feuilles avec le chou. On utilise un soc qui facilite l'arrachage en bougeant le sol. Deux courroies latérales montent les choux avec les feuilles jusqu'au séparateur de feuilles constitué d'un convoyeur à courroie inclinée à 29 degrés. Les feuilles sont entraînées vers le haut du convoyeur pour finalement tomber sous la récolteuse. À cause de leur forme et de leur poids, les choux roulent vers le bas du convoyeur où ils sont transférés dans le convoyeur d'élévation. Ce convoyeur prend les choux à la base du séparateur de feuilles et les monte jusqu'à la remorque où sont situées les boîtes. C'est un convoyeur de 60 cm de largeur avec des palettes souples de 15 cm de hauteur distancées de 35 cm. La partie supérieure est repliable pour la mettre en position de transport et pour s'ajuster à la hauteur de la remorque. Il monte les choux jusqu'au niveau du convoyeur horizontal installé sur la remorque qui transporte les boîtes; celle-ci est tirée par un second tracteur qui circule à côté de celui qui récolte. Les chocs sur les choux sont réduits car il n'y a pas de fond de tôle sous la courroie du convoyeur horizontal à l'endroit où les choux tombent. Les choux avancent ensuite vers des travailleurs qui les déposent délicatement dans les boîtes. Ceci permet d'effectuer un bon triage puisqu'on choisit seulement les bons choux et on laisse passer les choux trop petits ou avariés pour éviter qu'ils ne contaminent les autres dans l'entrepôt. Lorsque la récolteuse opère à 2,5 km/h il faut prévoir trois personnes pour faire un bon travail sur la remorque.

Le prototype a été testé au champ sur deux fermes expérimentales d'AAC à Ste-Clotilde et à

L'Acadie. Des essais ont aussi été effectués en octobre chez cinq producteurs. Deux étaient situés sur la rive sud de Montréal et trois étaient sur la rive nord. Les résultats ont montré que la récolteuse causait des dommages aux choux dans le séparateur de feuilles et lors de la chute sur le convoyeur horizontal. Ceci nous a indiqué où mettre nos efforts afin de minimiser ces dommages. En général, les choux récoltés par notre prototype ont une belle qualité de coupe et subissent un minimum de dommages si nous leur laissons au moins 3 à 4 feuilles enveloppantes.

Des choux ont été entreposés en condition commerciale chez quatre producteurs afin de comparer la qualité de conservation de choux récoltés avec le prototype vs ceux récoltés à la main. On a récolté des boîtes de choux à la machine et d'autres à la main; ces boîtes ont été placées côte à côte dans les entrepôts des producteurs. La qualité des choux a été évaluée lors de la mise en entrepôt et le sera à nouveau à la sortie des entrepôts au printemps 2001. Un système d'acquisition de données a été installé sur place afin d'enregistrer en continu la température et le pourcentage d'humidité dans l'entrepôt pour la durée de l'expérience. Il s'agira de déterminer en proportion les pertes encourues au niveau de la masse de choux afin d'obtenir des choux de qualité acceptable pour le marché frais après chaque période. De plus, les causes des dommages aux choux seront identifiées.

Il reste plusieurs étapes à accomplir pour la prochaine année. Tout d'abord, cet hiver, nous allons modifier le prototype pour le rendre plus facile à ajuster, pour augmenter la durée de vie du couteau et pour augmenter la capacité du séparateur de feuilles et du convoyeur d'élévation. L'été et l'automne prochains, nous ferons des essais de récolte dans différents champs avec plusieurs cultivars de choux d'été et d'automne afin de pouvoir déterminer quels cultivars sont les mieux adaptés à la récolte mécanique. Nous referons les comparaisons de qualité des choux récoltés à la main vs à la machine chez plusieurs producteurs de choux. Les expériences de conservation à long terme en entrepôt réfrigéré seront aussi répétées durant l'hiver 2001-2002. Pendant ce même hiver, Univerco sera en mesure de finaliser le design et de construire les premières récolteuses de version commerciale qui seront en opération dans les champs des producteurs en 2002.

En terminant, j'aimerais remercier tous les membres de l'équipe du projet et tous les producteurs qui nous ont accueilli chez eux cet automne.

DÉVELOPPEMENT D'ÉQUIPEMENTS POUR LES CERISES DE TERRE

Roger Chagnon

Centre de recherche et de développement en horticulture, Agriculture et Agroalimentaire Canada,
430 Boul. Gouin, St-Jean-sur-Richelieu, Québec, J3B 3E6
< chagnonr@em.agr.ca >

RÉSUMÉ :

La cerise de terre est une nouvelle culture qui exige plusieurs récoltes manuelles puisque les fruits mûrs se détachent des plants et tombent sur le sol. La récolte est difficile puisque le plant est une vigne rampante qu'il faut soulever pour récolter les fruits. Afin de solutionner ce problème, Luc et Bernard Granger de la Ferme Granger et Fils, le Centre de R&D en horticulture d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à St-Jean-sur-Richelieu ont collaboré pour développer une récolteuse et une éplucheuse mécaniques pour les cerises de terre. Le projet a été réalisé en 1996 et en 1997 avec Roger Chagnon, ing., comme chef de projet et responsable du côté ingénierie. Les assistants de recherche étaient : Éric St-Denis ing. stag., Benoît Lacasse ing., Sylvain Fortin ing. et Patrick Ramsay ing. stag.. Sylvie Jenni, PhD, agr. était en charge du volet agronomique du projet.

Récolteuse

À la Ferme Granger et fils, la cerise de terre est cultivée sur une butte de terre d'environ 2 m de largeur recouverte de paillis plastique. La récolteuse que nous avons développée, a été construite à partir d'une andaineuse automotrice à transmission hydrostatique. C'est un modèle à un rang qui comporte un cueilleur, deux convoyeurs pneumatiques et un système de nettoyage des cerises. Le cueilleur soulève délicatement les branches des plants sans les abîmer puis deux bras balayent la surface du plastique pour amener les fruits jusqu'aux bouches d'aspiration situées de chaque côté de la machine. Les balais doivent être très doux et bien ajustés pour ne pas abîmer les paillis de plastique. Des ventilateurs poussent de l'air dans des tuyaux qui créent , par effet de venturi, une succion dans les bouches d'aspiration. Les fruits sont aspirés puis poussés jusque dans une boîte en moustiquaire de laquelle ils tombent sur le nettoyeur de cerises. Le nettoyeur est un simple convoyeur incliné à courroie rugueuse. Les feuilles et les bouts de branches sont transportés vers le haut d'où ils tombent au sol à côté du rang. Pour leur part, les fruits roulent librement vers le bas du convoyeur puis tombent dans des bacs de récolte. Le tout est opéré par deux personnes : un conducteur et une autre qui déplace les bacs de cerises.

Éplucheuse

Nous avons aussi développé une « éplucheuse » de cerises. En fait cette machine enlève l'enveloppe en forme de coeur qui recouvre les cerises de terre. Cette opération est réalisée en usine pour permettre la cuisson ou la congélation des cerises. La machine comporte une trémie d'alimentation dans laquelle on verse les cerises qu'un convoyeur à doigts viendra chercher une à une pour les amener dans un tuyau où elles seront mouillées. Par la suite elles glissent sur deux petits rouleaux qui arrachent les enveloppes sans briser les fruits.

Les détails pourront être dévoilés seulement à partir de janvier 2001. Une demande de brevet est en cours.

ÉVALUATION DE CAPTEURS DE RENDEMENT DANS UNE FOURRAGÈRE

Philippe Savoie[1, 2], Stéphane Allard[2] et Roger Thériault[2]

[1]Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Ste-Foy, Québec, G1V 2J3 <psavoie@grr.ulaval.ca>
[2]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4 <sallard@grr.ulaval.ca>

RÉSUMÉ :

La mesure du rendement des cultures requiert à la fois l'estimation de la masse humide et de la teneur en eau. Diverses technologies de mesure de la masse sont déjà utilisées commercialement pour certaines cultures comme les céréales et les légumes où la variation de la teneur en eau est relativement faible. Toutefois, les plantes fourragères présentent un défi particulier à cause de la grande variation de la teneur en eau durant la récolte et des diverses méthodes de récolte (fourrage haché finement ou grossièrement, fourrage non-haché pressé en balles rondes ou rectangulaires). Dans ce projet, nous avons concentré la recherche sur des capteurs adaptés à la récolte de l'herbe hachée finement avec une fourragère. Le schéma ci-bas (figure 1) illustre quelques principes qui peuvent être utilisés pour estimer le débit et la teneur en eau durant la récolte de l'herbe hachée.

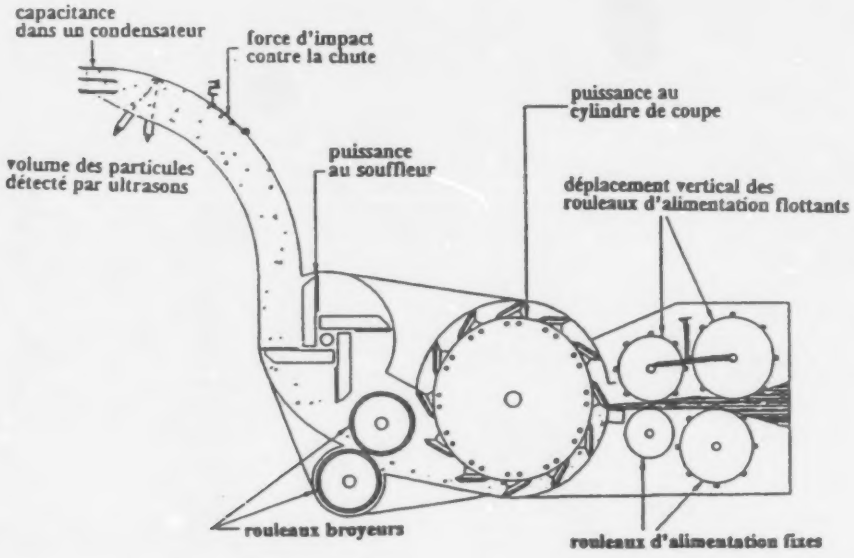


Figure 1. Vue en coupe de quelques mécanismes (rouleaux) de la fourragère et des principes utilisés pour estimer le débit et la teneur en eau des fourrages.

En 1999, on a installé plusieurs capteurs : un potentiomètre qui mesure le déplacement linéaire des rouleaux d'alimentation, trois dynamomètres mesurant le couple sur trois arbres de rotation (au cylindre de coupe, au souffleur et à la prise de force entre le tracteur et la fourragère), une cellule de charge qui mesure la force d'impact contre une plaque pivotante installée dans la chute et un système oscillateur-condensateur qui estime la variation de la capacitance, elle-même influencée par la quantité d'eau qui circule dans la chute. On a aussi installé un détecteur de particules par ultrasons, mais il n'a pu être convenablement relié au système d'acquisition de données. Ce dernier était un ordinateur portable muni de deux cartes d'acquisition de données et d'un logiciel de gestion des données (LabVIEW). On a modifié un wagon basculant de façon à y installer quatre balances pour mesurer en continu la masse du fourrage humide récolté. Avec la fourragère et le wagon instrumentés, nous avons récolté 42 wagons de fourrage à la ferme expérimentale de Normandin au Lac St-Jean. Nous avons ainsi obtenu 132 séquences de récolte permettant de comparer un débit normé, mesuré dans le wagon, et les signaux des capteurs.

Pour des raisons pratiques, l'analyse des résultats s'est limitée à cinq capteurs. Le dynamomètre au souffleur s'est brisé assez rapidement et on n'a pas pu analyser ses résultats. Deux capteurs se sont nettement démarqués des autres par leur corrélation élevée avec le débit humide (figure 2). La cellule de charge qui mesurait l'impact a présenté le meilleur coefficient de détermination ($R^2 = 0,951$) entre son signal filtré (la force d'impact) et le débit humide mesuré qui a varié entre 1 et 16 kg/s. L'erreur-standard de prédiction était de 0,7 kg/s, ce qui est relativement précis pour des débits élevés. Le deuxième meilleur capteur était le potentiomètre pour lequel $R^2 = 0,863$; l'erreur-standard était de 1,2 kg/s. Le dynamomètre placé sur la prise de force avait un coefficient $R^2 = 0,826$ tandis que le dynamomètre au cylindre de coupe avait un $R^2 = 0,705$. Le système oscillateur-condensateur avait un $R^2 = 0,468$ pour la prédiction du débit humide.

On a aussi estimé la corrélation entre les capteurs et la teneur en eau du fourrage qui a varié entre 46 et 71% durant la récolte de 1999. Le système oscillateur-condensateur avait le coefficient R^2 le plus élevé pour prédire la teneur en eau (0,662). L'erreur-standard était de 4,0 unités de pourcentage, ce qui est toutefois excessif pour obtenir une estimation précise du rendement de la matière sèche.

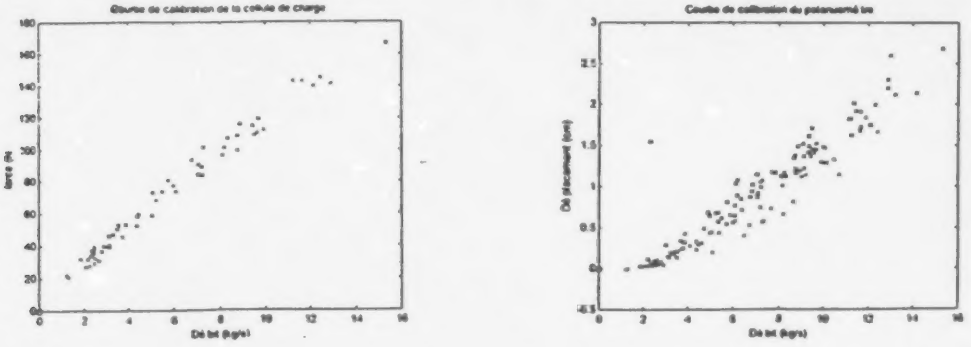


Figure 2. Force d'impact dans la chute et déplacement vertical du rouleau d'alimentation en fonction du débit humide (Normandin, août 1999).

En 2000, nous avons retenu seulement le potentiomètre et la cellule de charge. Ces deux capteurs ont été installés sur une fourragère identique à celle de l'année précédente (Dion, modèle 1224) à la ferme de Monsieur Germain Fiset de St-François de Montmagny. On visait l'évaluation des capteurs dans des conditions commerciales, sachant que M. Fiset récolte plus de 800 voyages de fourrage par an à des débits pouvant atteindre 30 kg/s (le double de ce qui avait été évalué à Normandin en 1999).

L'évaluation des capteurs en 2000 a surtout porté sur leur robustesse. Au début de la saison, le potentiomètre a subi une légère déflexion à cause des forces latérales et des vibrations. Une fois le système d'attache renforcé, le potentiomètre a fonctionné sans problème durant tout le reste de l'été. La cellule de charge a exigé plusieurs modifications au cours de l'été. On a d'abord changé l'emplacement, plaçant le pivot plus bas dans la chute à un endroit où la force d'impact est plus grande. Par la suite, on a réduit les dimensions de la plaque pivotante à 205 mm de large et 300 mm de long par rapport à 235 mm de large et 500 mm de long en 1999. En principe, une plaque plus petite devait moins perturber l'écoulement du fourrage et mieux préserver la résistance mécanique de la chute. En pratique toutefois, la cellule de charge et la plaque d'impact sont demeurées sujettes à des bris et à des défauts de fonctionnement au cours de l'été. D'un strict point de vue mécanique, le potentiomètre a été plus fiable que la cellule de charge.

Au cours des prochaines années, la priorité du développement devrait se situer au niveau de la mesure de la teneur en eau afin de réduire l'erreur-type à moins de 1% (une unité de pourcentage) sur une base humide. À cause du coût relativement modeste de la mesure des propriétés électriques, on pense que ce type de capteur jumelé avec un potentiomètre bien calibré pourrait représenter une combinaison économique et valable pour générer des courbes de rendements précises pour la récolte des fourrages. De tels capteurs pourraient aussi servir à d'autres applications comme le dosage d'additifs à ensilage modulé en fonction de la teneur en eau et du débit, l'ajustement de la longueur de hachage selon la teneur en eau et l'avertissement du besoin d'affûtage des couteaux et d'autres ajustements suite à la baisse du débit.

Remerciements. Les partenaires Dion Machineries (M. Gabriel Choinière) et Innotag (M. Justin Larouche) ont contribué à la réalisation de ce projet, avec l'appui financier du CORPAQ. M. Dominic Marcotte a conçu le système de pesée du wagon et a coordonné la collecte des données au champ en 1999. M. Hugues Martel a conçu le système d'acquisition de données. MM. Yannick Tremblay et Patrick Lemire ont assisté à la collecte de données en 1999. M. Hubert Landry a participé à la collecte de données et aux modifications des capteurs en 2000. M. Jean Lafond à Normandin et M. Germain Fiset à St-François ont permis l'accès à de grandes superficies de fourrages nécessaires pour la collecte de données. Nous remercions tous ces partenaires et collaborateurs.

MANIPULATION DES ANDAINS POUR LA RÉCOLTE DU FOIN DESTINÉ À LA COMMERCIALISATION

Yannick Tremblay[1], Simon Dubreuil[1], Mohamed Khelifi[1,2] et Philippe Savoie[1,2]

[1]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval,
Ste-Foy, Québec, G1K 7P4 < ytremblay@moncourrier.com >
[2]Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Ste-Foy, Québec, G1V 2J3 < psavoie@grr.ulaval.ca >

RÉSUMÉ

On a séché des andains de fléole des prés en laboratoire pendant 3 ou 4 jours à trois stades de maturité (gonflement, début épiaison, épiaison). Avec une séquence de 4 h d'éclairage (simulant l'ensoleillement) par jour et 20 h à l'ombre, le temps nécessaire pour atteindre une teneur en eau cible de 16% ($t_{16\%}$) était en moyenne 62, 43 et 34 h aux trois stades de maturité, respectivement. Quand les andains reposaient sur un sol sec plutôt que sur un sol saturé à 80% d'eau, il fallait de 5 à 13 h moins de temps pour atteindre $t_{16\%}$. Le conditionnement mécanique intense réduisait le temps de séchage de 4 à 9 h. L'étalement du fourrage mesuré par la masse par unité de surface permettait de réduire le temps de séchage de 4 à 7 h. Le tournage des andains 24 h après la fauche réduisait le temps de séchage de 6 h. Pour la production de foin destiné au commerce, on peut ainsi réduire le temps de séchage d'au moins une journée en fauchant le fourrage à un stade de maturité avancé, en le conditionnant, en l'étalant, en le tournant et en le déposant sur la portion sèche du chaume.

INTRODUCTION

Un marché important pour le foin commercial pourrait se développer rapidement si on mettait au point des techniques pour bien sécher le foin au champ ou à l'entrepôt à une teneur en eau inférieure à 16%. Présentement dans l'est du Canada, les conditions climatiques et les techniques de manipulation des andains au champ font en sorte que la plupart des balles de foin sont récoltées à des teneurs en eau entre 20 et 30%, puis séchées à l'air forcé en grange. Pour ce faire, on presse des balles à faible densité (environ 120 kg de matière sèche par m^3) pour que l'air circule facilement à travers les balles et évapore l'eau en excès. Pour les producteurs laitiers et de boeuf de boucherie, ces balles peu denses et dont la teneur en eau finale atteint 18 à 20% conviennent pour l'autoconsommation à la ferme. Cependant pour le commerce du foin, on cherche à faire des balles plus denses (180 kg MS/m^3 et plus) afin de réduire le coût de transport et plus sèches (entre 12 et 16% de teneur en eau) afin d'éviter le risque de développement de moisissures durant les longues périodes d'entreposage.

Dans un contexte de production de foin pour le commerce, on peut récolter le fourrage humide (20 à 30% de teneur en eau), et le placer dans un séchoir à l'air chauffé pour atteindre la teneur en eau désirée. Il faut toutefois utiliser des ventilateurs puissants si les balles sont pressées à haute densité au champ. On peut aussi presser les balles à faible densité et les surcomprimer après le séchage.

Toutefois, si on parvient à manipuler l'andain au champ de façon à abaisser la teneur en eau sous le seuil de 16%, on pourrait alors presser le foin à haute densité et pratiquement éliminer le besoin de compléter le séchage en grange ou de surcomprimer après la récolte.

Le projet avait pour but d'évaluer en laboratoire l'effet des traitements mécaniques (conditionnement, tournage, épaisseur des andains), de la maturité de la plante et des conditions environnementales (humidité du sol, pouvoir évaporant de l'air et du rayonnement) sur le séchage de la fléole, la principale culture fourragère utilisée pour la production du foin commercial.

MÉTHODOLOGIE

Protocoles expérimentaux

En laboratoire à l'Université Laval à Sainte-Foy, on a transporté de la fléole fraîchement fauchée, en provenance du Centre de recherche de Deschambault, à trois dates (12, 20 et 26 juin 2000) correspondant à trois stades de maturité (gonflement, début épiaison, épiaison). À chacune des dates de fauche, on avait un protocole expérimental permettant d'évaluer divers facteurs décrits ci-bas.

Durant la première expérience (12 juin), on a comparé trois facteurs: (1) le conditionnement mécanique (surconditionné ou non); (2) l'humidité du sol sur lequel reposent les andains (sol sec ou saturé à 80% d'eau); (3) le tournage des andains (aucun tournage, tournés 24 ou 48 h après la fauche). On avait 12 combinaisons de traitements (2 niveaux de conditionnement x 2 niveaux d'humidité au sol x 3 niveaux de tournage de l'andain). On a effectué trois répétitions, soit 36 plateaux contenant des andains de fourrage. On a fixé la masse de fourrage humide dans un plateau à 600 g pour une surface de 0,3 m par 0,45 m, ce qui équivaut à 4,44 kg de fourrage humide/m^2 ou 7,68 t MS/ha compte tenu que la teneur en eau moyenne était de 82,7% (base humide, moyenne de 36 échantillons). Une telle masse équivaut à un rendement de 3,8 t MS/ha qui serait andainé pour couvrir la moitié de la surface.

Durant la deuxième expérience (20 juin), on a comparé les trois facteurs suivants: (1) le conditionnement mécanique (surconditionné ou non); (2) l'humidité du sol sur lequel reposent les andains (sol sec ou saturé à 80% d'eau); (3) la masse de fourrage par unité de surface (400, 600 ou 800 g par plateau). On avait 12 combinaisons de traitements (2 niveaux de conditionnement x 2 niveaux d'humidité au sol x 3 niveaux de masse par unité de surface). On a effectué trois répétitions, soit 36 plateaux contenant des andains de fourrage. On a fixé le traitement de tournage en tournant les 36 andains 48 h après la fauche.

Durant la troisième expérience (26 juin), on a comparé les trois facteurs suivants : (1) le conditionnement mécanique (aucun conditionnement, surconditionné une fois, surconditionné deux fois); (2) le tournage des andains (aucun tournage, tournés après environ 48 h de séchage); (3) la masse de fourrage par unité de surface (400 ou 800 g par plateau). On avait 12 combinaisons de traitements (3 niveaux de conditionnement x 2 niveaux de tournage x 2 niveaux de masse par unité de surface). On a effectué trois répétitions, soit 36 plateaux contenant des andains de fourrage. On a choisi un sol sec sur lequel reposaient les andains.

Préparation des andains et traitements

Le fourrage était fauché au champ entre 8h00 et 9h00 le matin. Une partie du fourrage était surconditionnée, c'est-à-dire broyée avec un banc d'essai à trois rouleaux métalliques rainurés disponible en laboratoire. Les trois rouleaux étaient ajustés avec un écartement de 1 mm. La moitié des plateaux étaient remplis de fourrage surconditionné, l'autre moitié de fourrage non conditionné.

Une quantité pré-déterminée de fourrage (600 g sur une base humide pour la première expérience) était placée sous forme d'andain (couché à l'horizontale) dans de petits plateaux. On plaçait douze plateaux à la fois dans un environnement de séchage, appelé tunnel et simulant les conditions au champ avec vent et rayonnement. L'environnement de séchage incluait un ventilateur qui soufflait de l'air ambiant à 24°C ± 2°C à une vitesse horizontale moyenne de 0,7 m/s au-dessus des andains. Deux lampes infrarouges de 1600 W rayonnaient avec une intensité de 980 W/m^2 ; elles étaient situées à environ 1,0 m au-dessus des andains. Le taux d'évaporation moyen de bacs d'eau placés dans le tunnel était de 0,42 mm/h (écart-type de 0,08 mm/h). À cause des variations de l'évaporation entre les 12 emplacements dans le séchoir, on a prévu une procédure de rotation : les plateaux étaient déplacés à toutes les dix minutes de façon à ce que chaque plateau occupe chacune des 12 positions durant une période de 2 heures.

Les plateaux contenant les andains étaient placés sur un bac rempli de sable fin, composé de silice tamisée avec un diamètre moyen de 0,14 mm. Les bacs de sable avaient une surface légèrement plus grande que celle des plateaux à fourrage (0,30 m par 0,45 m) afin que le fond du plateau repose complètement sur le sable ; les bacs de sol contenaient une épaisseur d'environ 60 mm de sable. Une moitié des bacs de sol contenait du sable sec, l'autre moitié contenait du sable humide saturé à 80% d'eau. Le but de ce traitement (sol sec, sol humide) était d'évaluer l'influence de l'humidité du sol sur le séchage des andains qui reposent au-dessus. Quant au tournage des andains, il s'effectuait manuellement après environ 24 ou 48 h selon le protocole.

Procédure de séchage

On faisait sécher 12 plateaux à la fois qui représentaient chacune des 12 combinaisons de traitement selon les protocoles à chaque date. La première série de 12 plateaux suivait la séquence suivante de séchage: 2 h dans le tunnel, 4 h à l'ombre, 2 h dans le tunnel, 12 h à l'ombre; au jour 2, tournage s'il y a lieu vers 8h00 le matin, 2 h en tunnel, 4 h à l'ombre, 2 h en tunnel, 16 h à l'ombre; au jour 3, tournage s'il y a lieu vers 8h00 le matin, 6 h en tunnel, fin de la répétition 1. La deuxième série suivait la même séquence que la première, avec un décalage de 2 à 6 heures, selon le jour. La troisième série suivait la même séquence avec décalage; la dernière journée en tunnel était décalée au quatrième jour.

Pour suivre l'évolution du séchage, les plateaux étaient pesés à chaque entrée ou sortie du tunnel. Pour estimer la teneur en eau initiale, on a prélevé 36 échantillons du fourrage frais (chacun correspondant à un plateau). On a estimé la teneur en eau finale en prélevant tout le fourrage résiduel des plateaux à la fin des essais de séchage et en le plaçant dans une étuve à 60°C pendant 72 h. Pour estimer les teneurs en eau intermédiaires (entre le début et la fin), on s'est basé sur la pesée et la matière sèche moyenne dans chacun des plateaux.

Les teneurs en eau ont servi à calculer des coefficients de séchage selon le modèle de Rotz et Chen (1985; Alfalfa drying model for the field environment. Trans. ASAE 28(5):1686-1690).

$$M = M_o \exp(-k t) \qquad (1)$$

où M est la teneur en eau (base sèche, i.e. g d'eau/g MS) après une période de séchage t (h), M_o est la teneur en eau initiale, au début de la période de séchage, k est le coefficient de séchage (h^{-1}). Le coefficient était simplement estimé en permutant l'équation ci-haut :

$$k = (1 / t) \ln(M_o / M) \qquad (2)$$

On a estimé des coefficients de séchage pour quatre périodes. Le coefficient k_1 correspond au séchage durant le jour 1, soit pendant 4 h en tunnel et 4 h à l'ombre, c'est-à-dire entre 0 et 8 h après le début du séchage en tunnel. Le coefficient k_2 correspond au séchage durant le jour 2, soit pendant 4 h en tunnel et 4 h à l'ombre, c'est-à-dire entre 20 et 28 h après le début du séchage en tunnel pour la répétition 1, entre 22 et 30 h pour la répétition 2 et entre 24 et 32 h pour la répétition 3. Le coefficient k_3 correspond au séchage durant le troisième jour en tunnel seulement pendant 6 h, c'est-à-dire entre 44 et 50 h après le début du séchage en tunnel pour la répétition 1, entre 50 et 56 h pour la répétition 2 et entre 68 et 74 h pour la répétition 3. On a aussi estimé un coefficient global de séchage, entre le début et la fin, soit k_{0F} qui correspond au séchage de 0 à 50 h pour la répétition 1, de 0 à 56 h pour la répétition 2 et de 0 à 74 h pour la répétition 3.

Une autre variable estimée ($t_{16\%}$) était le temps pour atteindre une teneur en eau cible de 16% sur une base humide (0,1905 g d'eau/g MS, sur une base sèche). Cette variable était calculée par interpolation si la teneur en eau finale du fourrage était inférieure à 0,1905 g/g. Elle était calculée par extrapolation si la teneur en eau finale était supérieure à 0,1905 g/g. On utilisait le coefficient k_3 pour calculer le temps supplémentaire nécessaire pour atteindre la teneur en eau cible.

Analyse statistique

On a utilisé le logiciel SAS pour faire l'analyse de variance des principales variables calculées, soit k_1, k_2, k_3, k_{0F} et $t_{16\%}$. On a analysé chacune des trois expériences (fauches du 12, 20 et 26 juin) séparément. On a considéré les trois répétitions de 12 plateaux à chaque fauche comme trois blocs aléatoires. Ces trois répétitions ont toujours la même période totale de séchage en tunnel (14 h sur trois jours), mais des périodes différentes de séchage à l'ombre. On s'attend à ce que la répétition 3 sèche plus que les autres parce qu'elle a passé plus de temps à l'ombre où il y avait un certain séchage. En traitant les répétitions comme des blocs aléatoires dans l'analyse statistique, on enlève la différence entre les répétitions et on concentre la comparaison entre les 12 combinaisons de traitements, l'objectif principal de l'expérience.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Première expérience

La fléole fauchée le 12 juin était au stade gonflement et avait une teneur en eau initiale moyenne de 82,7% (écart-type de 1,6%). Les résultats de cette expérience sont présentés au tableau 1. Durant la première journée de séchage, le type de sol a eu un effet statistiquement significatif sur le séchage ($p = 0,001$); le coefficient k_1 était de 0,088 h^{-1} sur sol sec et de 0,080 h^{-1} sur sol humide. Le conditionnement mécanique avait aussi un effet significatif ($p = 0,05$). Le coefficient k_1 était de 0,087 h^{-1} avec conditionnement et de 0,082 h^{-1} sans conditionnement. Le tournage ne pouvait pas avoir d'effet significatif le premier jour puisqu'il n'était appliqué que 24 ou 48 h après la fauche.

Globalement sur toute la période de séchage, le coefficient de séchage k_{0F} était influencé par le type de sol et le tournage ($p = 0,001$ et 0,005) et de façon moins significative ($p = 0,08$) par le conditionnement mécanique. Le temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau cible de 16% ($t_{16\%}$) est un indicateur de l'effet cumulé de tous les traitements sur le séchage. Au tableau 1, on observe que le type de sol a eu un effet très significatif ($p = 0,001$): le temps $t_{16\%}$ était de 55,0 h sur sol sec et de 68,3 h sur sol humide, une différence moyenne de 13 h. Le tournage des andains a aussi eu un effet significatif ($p = 0,05$). Les temps $t_{16\%}$ étaient de 64,9, 58,4 et 61,7 h en moyenne pour T_0, T_{24} et T_{48}, respectivement. Il était donc plus bénéfique de tourner tôt, 24 h après la fauche, que tardivement, 48 h après la fauche. Le tournage T_{24} permettait de sauver 6 h de séchage en moyenne par rapport au témoin T_0. Le conditionnement mécanique a aussi eu un effet, mais moins significatif ($p = 0,08$). Il a réduit de 4 h en moyenne le temps de séchage (59,7 h vs 63,7 h sans conditionnement). Ainsi, une combinaison de sol sec (-13 h), de tournage (-6 h) et de conditionnement mécanique (-4 h) pourrait réduire pratiquement d'une journée complète le temps nécessaire pour obtenir du foin à 16%. On a d'ailleurs observé au tableau 1 une différence de 23 h entre le temps le plus court (50,5 h sur sol sec, tourné après la fauche et conditionné) et le temps le plus long (73,9 h sur sol humide, sans conditionnement et sans tournage).

Deuxième expérience

La fléole fauchée le 20 juin était au stade début épiaison et avait une teneur en eau initiale de 78,9% (écart-type de 0,9%). Durant la première journée de séchage, le fourrage a séché aussi vite sur sol humide que sur sol sec (tableau 2). Avec un conditionnement, le coefficient k_1 était de 15% supérieur au coefficient sans conditionnement (0,119 h^{-1} vs 0,104 h^{-1}). Plus la masse par unité de surface augmentait, plus le coefficient de séchage baissait (0,135, 0,110 et 0,089 h^{-1} pour 400, 600 et 800 g par plateau, respectivement).

Globalement sur toute la période de séchage, le coefficient de séchage k_{0F} était plus élevé sur sol sec que sur sol humide, plus élevé après conditionnement mécanique que sans conditionnement mécanique et plus élevé lorsque les andains étaient plus minces (avec une masse plus faible par unité de surface). On observe les mêmes effets significatifs pour le temps nécessaire à atteindre la teneur en eau cible de 16% (tableau 2). Sur sol sec, le temps de séchage moyen était de 40,5 h comparativement à 45,6 h sur sol humide. Le temps de séchage moyen était 38,4 h pour les andains conditionnés versus 47,6 h pour les andains non conditionnés. Le temps de séchage était de 39,7, 42,5 et 47,0 pour des masses de 400, 600 et 800 g par plateau, respectivement. On pouvait donc sauver environ 5 h de séchage sur sol sec, 9 h avec le conditionnement et 7 h en étalant l'andain sur

une surface doublée (400 au lieu de 800 g sur la même surface).

Troisième expérience

La fléole fauchée le 26 juin était au stade épiaison et avait une teneur en eau initiale moyenne de 81,8% (écart-type de 1,3%). Durant la première journée de séchage (tableau 3), le facteur de masse par unité de surface était très significatif ($k_1 = 0{,}161\ h^{-1}$ pour 400 g par plateau et $0{,}098\ h^{-1}$ pour 800 g par plateau). Le facteur tournage ne pouvait pas être significatif le premier jour parce qu'il n'était appliqué que 48 h après la fauche. Le facteur conditionnement mécanique n'était pas significatif non plus.

Globalement sur toute la période de séchage, le coefficient k_{0F} était affecté seulement par la masse dans le plateau; le tournage 48 h après la fauche et le conditionnement mécanique n'ont pas eu d'effets significatifs. En ce qui concerne le temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau cible de 16%, c'était encore la masse par unité de surface qui avait le plus d'effet: 32,2 h pour 400 g par plateau et 36,5 h pour 800 g par plateau (tableau 3). Le tournage 48 h après la fauche n'a pas eu d'effet. Le conditionnement mécanique était légèrement significatif ($p = 0{,}08$): 37,4 h pour aucun conditionnement, 32,2 h pour un conditionnement avec un passage à travers les rouleaux et 33,4 h pour un conditionnement avec deux passage à travers les rouleaux. Il n'y avait donc pas d'intérêt à faire un broyage plus intense (deux passages) puisque le temps de séchage n'était pas réduit comparativement à un broyage modéré (un passage). Une combinaison d'andain mince et de conditionnement modéré aurait permis de sauver plus de 10 h de séchage.

Effet du stade de croissance du fourrage sur le temps de séchage

L'analyse des résultats des trois expériences montre que le temps de séchage requis pour atteindre la teneur en eau cible de 16% a diminué avec la maturité du fourrage. À titre d'exemple et en se basant sur des conditions presque semblables (sol sec, pas de tournage, pas de conditionnement mécanique, 400 g de fourrage par plateau (600 g pour la première expérience)), le fourrage au stade gonflement a nécessité en moyenne 58,6 h de séchage au stade gonflement, 40,0 h au stade début épiaison et 29,2 h au stade épiaison. Globalement, les temps moyens ($t_{16\%}$) étaient de 62, 43 et 34 h pour les expériences 1, 2 et 3 (dates de fauche du 12, 20 et 26 juin), respectivement. Pour le foin de commerce, il est donc avantageux de retarder la récole à un stade de maturité plus avancé, quand le séchage sera plus facile et plus rapide.

CONCLUSIONS

Par rapport à un sol humide, un sol sec réduisait le temps total de séchage de la fléole de 13 h au stade gonflement et de 5 h au stade début épiaison. Quand on manipule des andains, il est donc souhaitable de les disposer sur une partie du chaume qui n'était pas précédemment couverte et qui serait plus sèche que la partie couverte par les andains. Le conditionnement mécanique effectué dans cette expérience avec trois rouleaux broyeurs striés a réduit le temps de séchage de façon modérée mais consistante (4, 9 et 5h dans les expériences 1, 2 et 3, respectivement, c'est-à-dire à trois stades de maturité). Le tournage 24 h après la fauche réduisait le temps de séchage de 6 h (expérience 1). Le tournage 48 h après la fauche ne réduisait guère le temps de séchage (3 h dans l'expérience 1 ou pas du tout dans l'expérience 3). La masse par unité de surface a eu un effet consistant en réduisant

le temps de séchage de 3 ou 7 h pour des masses de 600 ou 400 g par plateau, comparativement à 800 g par plateau (expérience 2). Dans l'expérience 3, une masse de 400 g prenait 4 h de moins à sécher qu'une masse de 800 g.

La combinaison de plusieurs facteurs peut accélérer le séchage au champ et diminuer le temps où les andains sont exposés au risque climatique. Les principaux facteurs observés pour réduire le temps de séchage nécessaire à la production du foin sont: la fauche à un stade de maturité avancé, l'étalement de l'andain pour réduire la masse par unité de surface, le tournage de l'andain 24 h après la fauche plutôt que 48 h après la fauche et l'application d'un conditionnement mécanique intense.

Tableau 1 Résultats de séchage de la fléole fauchée le 12 juin 2000 au stade gonflement (expérience 1)

	Sable sec						Sable humide									
	Sans conditionnement			Avec conditionnement			Sans conditionnement			Avec conditionnement				Probabilité		
Paramètres	T_0[a]	T_{24}	T_{48}	T_0	T_{24}	T_{48}	T_0	T_{24}	T_{48}	T_0	T_{24}	T_{48}	ET[b]	TS[c]	C	T
k_1[d], h^{-1}	0,0832	0,0859	0,0864	0,0897	0,0937	0,0920	0,0771	0,0789	0,0788	0,0808	0,0788	0,0841	0,004	0,001	0,05	NS
k_2, h^{-1}	0,0853	0,1075	0,0795	0,0789	0,1156	0,0835	0,0664	0,0896	0,0668	0,0695	0,1032	0,0640	0,005	0,001	NS	$0,001^{Q}$
k_3, h^{-1}	0,0969	0,0951	0,1019	0,1101	0,1003	0,1430	0,0904	0,0974	0,1191	0,1102	0,1153	0,1605	0,011	NS	0,002	$0,05^{L,Q}$
k_{OF}[e], h^{-1}	0,0483	0,0527	0,0483	0,0483	0,0540	0,0540	0,0393	0,0433	0,0423	0,0410	0,0453	0,0437	0,002	0,001	0,08	$0,05^{L,Q}$
$t_{16\%}$[f], h	58,6	53,3	59,6	56,8	50,5	51,4	73,9	67,4	68,9	70,4	62,4	66,8	3,3	0,001	0,06	$0,03^{Q}$

[a] Les indices de T indiquent aucun tournage (0), tournage 24 et 48 h après la fauche, respectivement.
[b] Erreur-type.
[c] TS = type de sol; C = conditionnement; T = tournage.
[d] Les indices des trois premiers coefficients de séchage k représentent jour 1, jour 2 et jour 3, respectivement.
[e] Coefficient global de séchage du début à la fin (c.-à-d. 50, 56 et 72 h pour les répétitions 1, 2 et 3, respectivement).
[f] Temps pour atteindre une teneur en eau cible de 16% (base humide).

Tableau 2 Résultats de séchage de la fléole fauchée le 20 juin 2000 au stade début épiaison (expérience 2)

	Sable sec						Sable humide									
	Sans conditionnement			Avec conditionnement			Sans conditionnement			Avec conditionnement				Probabilité		
Paramètres	M_{400}[a]	D_{600}	M_{800}	M_{400}	M_{600}	M_{800}	M_{400}	M_{600}	M_{800}	M_{400}	M_{600}	M_{800}	ET[b]	TS[c]	C	M
k_1[d], h^{-1}	0,1307	0,1016	0,0833	0,1490	0,1206	0,0999	0,1240	0,1003	0,0831	0,1374	0,1174	0,0895	0,007	NS	0,001	0,001[L]
k_2, h^{-1}	0,0969	0,0848	0,0690	0,1354	0,1035	0,0921	0,0886	0,0840	0,0652	0,1158	0,0789	0,0602	0,01	0,02	0,01	0,001[L]
k_3, h^{-1}	0,1755	0,1533	0,1579	0,1420	0,2061	0,2305	0,1403	0,1503	0,1555	0,2241	0,2197	0,2339	0,02	NS	0,001	NS
k_{0F}[e], h^{-1}	0,0664	0,0553	0,0495	0,0692	0,0693	0,0669	0,0552	0,0533	0,0474	0,0642	0,0587	0,0541	0,005	0,03	0,01	0,02[L]
$t_{16\%}$[f], h	40,0	46,5	51,9	34,7	34,2	35,7	45,5	47,4	54,5	38,6	41,7	45,8	3,5	0,03	0,001	0,01[L]

[a] Les indices de la masse des andains (M) indiquent la masse de fourrage humide (g) par plateau d'une surface de 0,45 m x 0,30 m.
[b] Erreur-type.
[c] TS = type de sol; C = conditionnement; M = masse de fourrage par unité de surface.
[d] Les indices des trois premiers coefficients de séchage k représentent jour 1, jour 2 et jour 3, respectivement.
[e] Coefficient global de séchage du début à la fin (c.-à-d. 50, 56 et 72 h pour les répétitions 1, 2 et 3, respectivement).
[f] Temps pour atteindre une teneur en eau cible de 16% (base humide).

Tableau 3 Résultats de séchage de la fléole fauchée le 26 juin 2000 au stade épiaison (expérience 3)

	M_{400}[a]						M_{800}									
	T_0[b]			T_{48}			T_0			T_{48}				Probabilité		
Paramètres	C_0[c]	C_1	C_2	C_0	C_1	C_2	C_0	C_1	C_2	C_0	C_1	C_2	ET[d]	M	T	C
k_1[e], h^{-1}	0,1617	0,1650	0,1673	0,1363	0,1733	0,1633	0,1037	0,1037	0,0900	0,0967	0,0997	0,0943	0,007	0,001	NS	NS
k_2, h^{-1}	0,1457	0,2007	0,2393	0,1210	0,2007	0,2317	0,1097	0,1197	0,0973	0,1073	0,1073	0,1130	0,02	0,001	NS	$0,01^L$
k_3, h^{-1}	0,2010	0,0663	0,0923	0,1777	0,1767	0,1157	0,1327	0,2103	0,2347	0,1747	0,2230	0,2160	0,04	0,02	NS	NS
k_{0F}[f], h^{-1}	0,0853	0,0777	0,0803	0,0730	0,0880	0,0777	0,0653	0,0797	0,0697	0,0673	0,0743	0,0717	0,006	0,02	NS	NS
$t_{16\%}$[g], h	29,2	34,9	30,7	38,9	28,0	31,2	42,1	32,1	36,4	39,3	33,6	35,2	3,2	0,03	NS	0,08

[a] Les indices de la masse des andains (M) indiquent la masse de fourrage humide (g) par plateau d'une surface de 0,45 m x 0,30 m.
[b] Les indices de T indiquent aucun tournage (0) et tournage 48 h après la fauche.
[c] Les indices de C indiquent sans conditionnement (0), conditionnement une fois (1) et conditionnement deux fois (2).
[d] Erreur-type.
[e] Les indices des trois premiers coefficients de séchage k représentent jour 1, jour 2 et jour 3, respectivement.
[f] Coefficient global de séchage du début à la fin (c.-à-d. 50, 56 et 72 h pour les répétitions 1, 2 et 3, respectivement).
[g] Temps pour atteindre une teneur en eau cible de 16% (base humide).

21 mars 2001
15h40 à 17h00

Thème 8 : Odeurs et fumiers

Modérateur : D. Choinière

DÉVELOPPEMENT D'OUTILS POUR LA MESURE D'ODEURS D'ORIGINE AGRICOLE

Francis Croteau[1], Daniel Massé[1] et Thierry Pagé[2]

[1]Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Lennoxville, Québec, < croteauf@em.agr.ca >
[2]Odotech inc., Montréal, Québec, H3V 1A2

RÉSUMÉ

La problématique des odeurs représente un défi important pour les producteurs de porcs du Québec. Les odeurs peuvent atteindre des niveaux inacceptables pour le voisinage, particulièrement lors de la reprise du lisier des fosses d'entreposage et lors des activités d'épandage au champs. Afin de solutionner cette problématique, plusieurs méthodes de traitement du lisier ont été mis au point. Certaines pratiques lors de l'épandage réduiraient également les odeurs émises. La manipulation de la diète des animaux ainsi que des modification dans la régie de l'élevage pourraient aussi contribuer à la réduction de l'intensité des odeurs d'origine agricole. Toutefois, afin de déterminer avec exactitude l'efficacité de tous ces outils disponibles dans la lutte aux odeurs ils est essentiel de posséder un outil fiable pour l'évaluation des odeurs d'origine agricole.

Contrairement aux odeurs d'origine industrielles souvent causés par un ou quelques composés impliqués dans les procédés, la nature des odeurs agricole est complexe. Les chercheurs ont identifiés plus de 150 composés volatils émis par les lisiers, les surfaces de plancher mouillées et les animaux souillés. De plus, la variabilité dans la concentration relative des composés odorant font que les évaluations sensorielles sont encore la base de l'analyse des odeurs. L'évaluation de l'acceptabilité ou de la gêne olfactive d'une odeur ne peut être faite que par le nez humain. Le développement d'un olfactomètre précis et polyvalent pour la quantification de plusieurs paramètres d'une odeur a donc été effectué par la compagnie ODOTECH inc., pour répondre aux exigences et aux spécifications d'Agriculture Canada. La mise au point finale a été effectuée par la suite, dans le laboratoire d'Agriculture Canada en collaboration avec ODOTECH inc.

L'olfactomètre ODILE est un olfactomètre à dilution dynamique permettant de déterminer quatre paramètres différents d'une odeur:

- Le seuil de perception olfactif d'un gaz odorant.
- Le niveau relatif d'intensité d'odeur.
- Le caractère hédonique de l'odeur.
- L'intensité de l'odeur par comparaison à un gaz de référence.

De plus, l'appareil permet de faire l'évaluation du jury en fonction de leur seuil de perception d'un gaz standard. ODILE est composé de plusieurs unités : unité de dilution, saturateur, logiciel d'exploitation, postes de flairage, système de purification d'air ainsi qu'un fût pressurisé pour l'échantillon gazeux. Le système est en place à l'intérieur d'un laboratoire d'AAC à Lennoxville.

Ce laboratoire est spécialement aménagé pour respecter les normes reliées aux analyses olfactométriques. La ventilation y est totalement indépendante et les surfaces des murs et du plancher sont recouvertes de matériaux n'absorbant pas les odeurs. Le système mis au point est à la fine point de la technologie et présente plusieurs avantages.

Le premier avantage est qu'il permet d'effectuer les quatre analyses et la sélection du jury sur le même appareil. De plus, chacune des analyses est effectué avec 6 panélistes de façon simultanée. Chaque poste de flairage comprend cinq cornets et un panneau lumineux servant à la communication entre le jury et l'opérateur. L'opération d'ODILE est presque entièrement automatisée grâce au logiciel d'exploitation. Les différents modules du logiciel d'exploitation permettent :

- La présentation des dilutions au jury.
- L'analyse en continue des résultats.
- L'utilisation de différents algorithmes de présentation des dilutions au jury.
- Le calcul des résultats selon plusieurs méthodes d'évaluations reconnues (ASTM, CEN, CUM).
- L'analyse sur la dispersion des réponses du jury et de chaque panéliste ainsi que de la corrélation entre différents paramètres de l'odeur.
- L'archivage de l'ensemble des données avec suivi de l'historique de chaque panéliste.
- L'impression de rapport d'analyse.

Le système possède également des avantages propres à chacune des analyses. Cet outil de travail permettra donc de déterminer de façon exacte les différents paramètres des odeurs d'origine agricole. Il sera alors possible de d'évaluer avec efficacement diverses méthodes de réduction des odeurs à l'intérieur des bâtiments d'élevage, à partir des lieux d'entreposage du lisier ou lors de la reprise et de l'épandage du lisier.

RÉDUCTION DES ODEURS ET DES ÉMISSIONS GAZEUSES PROVENANT DES BÂTIMENTS PORCINS

Stéphane Godbout[1], Roch Joncas[1], Stéphane P. Lemay[2], Jean-Pierre Larouche[1], Alfred Marquis[3], Daniel Massé[4]

[1]Institut de recherche et développement en agroenvironnement, Deschambault, Québec
< stephane.godbout@irda.qc.ca >
[2]Prairie Swine Centre Inc., Saskatoon, Saskatchewan
[3]Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4
[4]Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Lennoxville, Québec

RÉSUMÉ :

Le présent projet avait comme hypothèse de base que l'aspersion d'huile de canola jumelée à une diète spécifique pouvait réduire de façon significative les odeurs et les émissions gazeuses. L'objectif principal du projet de trois ans était de développer une stratégie combinant l'ingénierie et la nutrition afin de réduire les odeurs et les émissions gazeuses provenant des bâtiments porcins sans affecter les performances zootechniques. Le projet se déroulait en deux grandes étapes. La première consistait à une expérimentation à l'échelle réduite et la seconde à une expérimentation à l'échelle commerciale. Au total, trois objectifs devaient être atteints dont deux étaient reliés à la première étape. Le présent résumé ne traite que de la première étape et des deux objectifs y étant reliés, soit :

- déterminer l'effet interactif de quatre taux d'application d'huile de canola et de trois diètes expérimentales sur les odeurs, les poussières et les émissions gazeuses provenant de chambres de finition à échelle réduite;

- déterminer l'effet interactif des différents taux d'application d'huile de canola sur la composition chimique du lisier en fonction du temps.

Les douze traitements consistaient en quatre taux application d'huile, trois diètes et la combinaison de ces derniers. Les taux étaient de 0, 10, 20 et 30 ml/m^2. Les trois diètes étaient grossièrement constituées de 18 % de protéine pour la moulée témoin (C), de 16 % de protéine pour la seconde (LP) et de 16 % de protéine accompagné de 15 % d'hydrates de carbone fermentables sous forme d'écales de soya pour la dernière (LP-FC).

Afin de réaliser cette étude, douze chambres de finitions d'une dimension de 1,4 m par 2,44 m pouvant contenir quatre porcs furent construites. Constituées d'un plancher latté en béton, d'une entrée et d'une sortie d'air au plafond et d'un dalot indépendant, ces chambres construites à Deschambault ont démontré leur performance quant à leur étanchéité et leur facilité d'opération. Ce montage de douze chambres vraiment uniques permettra également dans le futur de réaliser des projets scientifiques de calibre international dans le domaine du génie et de la nutrition.

Le projet a permis de confirmer l'hypothèse de base, cependant, certaines précisions sont nécessaires. En effet, les traitements expérimentés permettent de réduire les poussières, les odeurs et les émissions gazeuses. Cependant, les meilleurs rendements ne sont pas obtenus avec le même traitement.

Dans l'ensemble, les analyses statistiques ont démontré que les traitements n'avaient aucun effet significatif sur les performances zootechniques. Les performances moyennes obtenues lors des essais étaient dans la norme pour un taux de gain de 1,07 kg/porc/jour , une consommation de 2,66 kg/porc/jour et une conversion de 2,49 kg de moulée/kg de gain de poids vif. Donc, il a été démontré qu'il était possible de modifier les rations tout en conservant d'excellentes performances.

Il est apparu également que ces mêmes diètes n'avaient aucun effet significatif sur les poussières. L'analyse statistique a démontré clairement que seule l'application d'huile avait un effet de réduction sur les émissions de poussières. Les traitements comportant des taux de 10, 20 et 30 ml/m^2 permettent de réduire respectivement de 88, 93 et 96 % les émissions de particules. Ces valeurs concordent avec celles de la littérature qui oscillaient entre 50 à 80 % selon la technique utilisée. En ce qui a trait aux émissions de poussières, aucun effet interactif n'a été détecté.

D'autre part, les rations ont été performantes dans la réduction des émissions gazeuses. Les analyses statistiques ont démontré que seule la diète avait une influence significative sur les émissions gazeuses. La diète LP a permis de réduire de 30 % les émissions de NH_3 comparativement à la diète témoin. Ce pourcentage atteint 45 % en utilisant la diète LP-FC. Ces différences se sont avérées significatives. Le meilleur taux de réduction a été obtenu avec le traitement combiné LP-FC et un taux de 30 ml/m^2 amenant la réduction à 50 %. Cependant, cette réduction n'est pas significativement différente du 45 % obtenu avec la diète LP-FC. Il est probable que ces résultats sont similaires et que cette réduction n'est due qu'à l'effet diète. Cette affirmation peut être corroborée par le résultat de l'analyse statistique indiquant que seule la diète avait un effet significatif sur l'émission de NH_3.

En ce qui concerne les autres gaz tels H_2S et CO_2, les analyses n'ont pas permis de détecter des différences significatives. Dans le cas du H_2S, ce gaz n'était présent que sous forme de trace et aucune valeur mesurée ne permettait des analyses approfondies. Les émissions de CO_2 ont pour leur part été relativement équivalentes d'un traitement à l'autre. Ceci peut être expliqué par le fait que ces émissions sont principalement issues des poumons des animaux. Une différence aurait pu être constatée si l'un des traitements avait augmenté le bien-être des animaux et par le fait même, son activité.

Pour leur part, les analyses sur les odeurs ont permis de détecter des effets significatifs. Ceux-ci seraient reliés à l'effet des traitements combinés. Il faut cependant noter que l'effet moulée est significatif si le niveau de probabilité était porté à 0,09. Il est fort probable que l'effet diète joue un rôle important dans la signification de l'effet interactif cité précédemment. Si cela était vrai, alors il pourrait être permis de conclure que les odeurs se comportent comme les gaz. Dans l'ensemble, le traitement comportant un taux d'application d'huile de 10 ml/m^2 et la diète C réduit les odeurs de 21 % comparativement au traitement témoin. Cette différence est significative. Il en est de même pour la réduction de 14 % obtenue avec la combinaison de la

diète C et un taux de 30 ml/m^2. Cependant, en ne considérant que l'effet moulée dans les traitements ayant un taux d'application d'huile nul, une réduction des odeurs de 25 % peut être observée. Malheureusement, le nombre de valeurs et la grandeur de l'erreur ne permettent pas de déclarer cet effet significatif à P=0,05. Cet effet pourrait l'être, comme indiqué précédemment, si le niveau P était porté à 0,09. Ces 25 % de réduction correspondent au 45 % de réduction des émissions de NH_3. Des études plus approfondies permettraient peut-être de découvrir le lien unissant le NH_3 et les odeurs.

Toujours concernant les émissions d'odeurs, plusieurs traitements combinés occasionnent des augmentations des émissions d'odeurs par rapport au traitement témoin. C'est le cas notamment avec les traitements comportant la diète LP et des taux d'application d'huile élevés. L'origine de ce phénomène peut être reliée à la décomposition de l'huile de canola ou encore à l'activité bactérienne favorisée par l'apport de nourriture supplémentaire. Il faut être tout de même prudent par rapport aux odeurs puisque seule l'intensité a été évaluée et que celle-ci ne tient nullement compte de la nature de l'odeur.

Donc, dans les conditions de la présente expérience, il n'a pas été possible de conclure que les odeurs étaient reliées aux poussières, du moins à l'intérieur des chambres. Les résultats auraient pu être différents si les mesures prises l'avaient été à l'extérieur du bâtiment.

Les analyses sur les lisiers n'ont pas permis de détecter des tendances générales à l'exception de l'effet semaine. Dans tous les cas, (N, P, K, Mn, Mg, Na, Al, Cu, Fe, Cu, NNH4, Ntot, Zn, M.G. et TMS), c'est l'âge de l'animal qui semble être l'effet dominant. Ce phénomène est probablement lié aux capacités d'ingestion de l'animal qui se transforme avec l'âge et le poids.

Finalement, le projet a permis de confirmer l'hypothèse de base et de déterminer qu'il n'y avait pas d'effet interactif des traitements (en excluant l'âge de l'animal) sur la composition chimique du lisier en fonction du temps (objectif 2). En ce qui concerne l'objectif 1 de l'étape 1, il est apparu globalement que les diètes jouaient un rôle important sur les émissions d'odeurs et de gaz et que l'application d'huile rabattait efficacement les poussières. Cependant, aucun lien direct n'a pu être établi entre les odeurs et les poussières. Concernant le traitement idéal, celui-ci est difficile à déterminer puisque l'huile agit uniquement sur les poussières et que la diète agit sur les émissions gazeuses et probablement sur les odeurs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil Canadien du Porc, les Fédérations de producteurs de porcs provinciales et Agriculture et Agroalimentaire Canada pour le support financier. Nous ne pouvons passer sous silence l'appui technique et financier de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), du Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAE), de l'Université Laval, de l'Université de Saskatoon, du Centre de développement du porc du Québec, du Prairie Swine Centre Inc qui ont permis de réaliser ce projet.

MODÉLISATION DYNAMIQUE DES FLUX D'AZOTE DANS LES SITES D'EXPLOITATION PORCINE À PARTIR D'UN ENSEMBLE DE CARACTÉRISTIQUES DE TROUPEAU, D'ALIMENTATION, AINSI QUE DE GESTION DES LISIERS ET DES BÂTIMENTS

Philippe Berthiaume[1], Michel Bigras-Poulin[1] et Alain N. Rousseau[2]

[1]Université de Montréal, Faculté de médecine vétérinaire,
3200, rue Sicotte, St-Hyacinthe, Québec, J2S 2M2
<berthip@ere.umontreal.ca>
[2]Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, suite 020, C.P. 7500, Ste-Foy, Québec, G1V 4C7

RÉSUMÉ :

On peut estimer la charge régionale d'azote provenant des exploitations porcines à partir du nombre d'unités animales, de la quantité quotidienne de déjections et de leur valeur fertilisante moyenne (par unité animale). Cependant, d'autres caractéristiques peuvent être intégrées dans ces estimations. Le recensement agroenvironnemental des exploitations porcines du Québec effectué pour la FPPQ en est un exemple. Dans ce cas, l'évaluation de la charge fertilisante a été réalisée à partir de valeurs moyennes de lisier, qui ont été ajustées par la suite pour tenir compte des caractéristiques de l'entreprise (par exemple : l'utilisation d'un système multiphases menait à l'utilisation d'une réduction de 10% de la charge, l'utilisation d'acides aminés de synthèse réduisait de 10 % la charge, *etc.*). Une approche différente est proposée par le comité *ad hoc* sur l'agroenvironnement constitué par le CPAQ en 1998. Dans ce cas, le point de départ est une estimation de l'azote contenu dans les déjections des animaux, à laquelle sont soustraites des pertes gazeuses de 25% au bâtiment et de 5% à l'entreposage. Pour ces deux méthodes, on peut avancer que l'évaluation de la charge fertilisante en azote des lisiers est effectuée selon une approche comptable ou de tenue de livre.

Afin d'étudier et de prendre en considération les effets interactifs des caractéristiques des entreprises québécoises, un modèle informatique global a été construit. Ce modèle représente explicitement les principaux réservoirs et flux d'azote d'un site de production porcine. Il permet d'évaluer l'influence des variations des caractéristiques du troupeau, de l'alimentation, ainsi que de la gestion des lisiers et des bâtiments et de leurs interactions. Par exemple, les facteurs qui causent une réduction de la quantité d'azote excrétée ont indirectement un effet sur la quantité d'azote ammoniacale émise. Afin de permettre un meilleur potentiel évolutif, ce modèle est assemblé de manière modulaire. Les différents modules pourront être ajustés ou remplacés au fur et à mesure que des algorithmes plus précis ou plus complets seront développés. Les sous-modèles qui constituent chacun des blocs proviennent de la littérature scientifique actuelle. À noter que la gestion solide sur litière n'est cependant pas intégrée à ce stade de développement du modèle.

L'utilisation de la notion de scénarios d'entreprises a été utilisée pour simuler différentes combinaisons de caractéristiques d'entreprises de manière à réduire considérablement le nombre

total de combinaisons de paramètres. Cette approche permet de concentrer l'analyse sur des cas de figure types. Les scénarios ont aussi été choisis de façon à représenter adéquatement l'importance de l'hétérogénéité des entreprises porcines au Québec. Ils permettent de considérer le type de production effectuée sur un site (maternité, pouponnière, engraissement et les différentes combinaisons qui s'en suivent), certains indices de productivité liés à la fois à la génétique et à la régie (taille moyenne des portées sevrées en maternité ou l'indice de conversion alimentaire en engraissement, *etc*). Différentes régies d'âge de sevrage ou de poids d'entrée et de sortie dans le cas des pouponnières et des engraissements sont aussi intégrées. Au niveau de l'alimentation, différents scénarios sont aussi utilisés pour considérer des modes d'alimentations plus ou moins axés sur la réduction de l'excrétion ainsi que des modes de distributions différents. Au niveau de la gestion des lisiers, l'intervalle de nettoyage est considéré en combinaison avec les caractéristiques des structures des bâtiments tels que le pourcentage de lattage, le matériau utilisé, le type de ventilation. La couverture ou non des fosses est aussi prise en considération.

La validation expérimentale actuelle du modèle provient d'un nombre restreint d'entreprises. Les caractéristiques des entreprises visées ont été recensées et des échantillons de lisiers ont été prélevés sous les planchers, dans la pré-fosse et dans la fosse. Une validation plus importante est également prévue.

ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE DES ENCLOS D'HIVERNAGE DE VACHES-VEAUX : APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Roch Joncas[1], Gaétan Gingras[2], Charles Jobin[2] et Michel Côté[1]

[1]Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Deschambault, Québec, G0A 1S0, < Roch.Joncas@irda.qc.ca >
[2]Direction de l'environnement et du développement durable, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec, Québec, G1R 4X6

RÉSUMÉ :

Une caractérisation des effluents de quatre types d'aménagements d'enclos extérieurs d'hivernage présentés dans le « Guide de bonnes pratiques agroenvironnementales pour la gestion des fumiers de bovins de boucherie » est en cours. Les installations de recherche ont été construites au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault. Les aménagements d'enclos étudiés sont : (1) sur sol naturel où la densité animale est de 125 m^2/vache-veau, (2) sur sol naturel avec litière de paille à 125 m^2/vache-veau, (3) sur lit de copeaux de bois à 25 m^2/vache-veau et (4) sur surface totalement bétonnée à 5 m^2/vache-veau. Les eaux de ruissellement de chaque enclos seront dirigées vers une bande végétale composée de graminées. Vingt-quatre vaches de boucherie y seront logées. Les eaux de ruissellement et de drainage de chacun des quatre enclos et des filtres seront caractérisées. Les performances zootechniques des animaux seront aussi évaluées.

Par la répétition de l'essai durant trois ans (1999-2000, 2000-2001 et 2001-2002) sur un sol en pente faible, sous des conditions climatiques variées, les observations sur les eaux de ruissellement, les eaux de drainage, la nappe phréatique, les sols et les litières permettront d'évaluer l'efficacité environnementale de ces régies et aménagements. Le montage expérimental et quelques résultats préliminaires seront présentés.

ÉVALUATION DES IMPACTS SUR LES SOLS ET L'EAU SOUTERRAINE DE L'ENTREPOSAGE AU CHAMP DE FUMIERS DE BOVINS ET DE VOLAILLES

Gilles Fortin[1], André D'Astous[1], Anne-Marie Christen[2], Pierre Fréchette[3]

[1]Envir-Eau inc., Gatineau, Québec, < gfortin@envireau.ca >
[2]Fédération des producteurs de bovins du Québec, Longueuil, Québec
[3]Fédération des producteurs de volailles du Québec, Longueuil, Québec

RÉSUMÉ :

Les producteurs de bovins ou de volailles doivent périodiquement entreposer les fumiers dans les champs avant de les épandre. Les amas ainsi constitués produisent du lixiviat qui est susceptible de s'infiltrer dans le sol et de rejoindre la nappe phréatique. Une table de concertation, regroupant divers Ministères et Fédérations de producteurs, a été formée afin de discuter d'un mode sécuritaire d'entreposage des fumiers. Par la suite, la firme Envir-Eau inc. a été mandatée pour réaliser un projet de recherche visant à établir les impacts environnementaux de l'entreposage au champ avec ou sans recouvrement des amas par une membrane imperméable. Le programme comprenait trois volets : une caractérisation détaillée de fumiers provenant de plusieurs fermes, un essai pratique au champ et une modélisation mathématique visant à établir les impacts environnementaux.

Les fumiers de bovins et de volailles présentent des différences importantes au niveau de leurs propriétés physiques et chimiques. Ils réagissent différemment aux contraintes d'entreposage.

Au niveau de l'eau souterraine, l'impact mesuré après un an d'entreposage varie selon les types de fumier et d'amas. Dans le cas des amas couverts, on retrouve une concentration maximale en nitrate pour le fumier de volailles alors que cette concentration est presque nulle pour celui de bovins. Pour les amas non couverts, la concentration en nitrate est supérieure pour le fumier de bovins en comparaison avec celui de volailles. L'évaluation de l'impact sur les eaux souterraines ne sera complète que lorsque toute la source aura été épuisée. Il demeure, après un an d'entreposage, que l'étendue du panache se situe à une distance inférieure à 10 mètres de la source pour un loam sableux.

L'ensemble des travaux de terrain et de modélisation a permis de faire progresser l'état des connaissances au niveau de la compréhension des mécanismes générant les impacts environnementaux. L'étude a permis d'établir des conditions favorisant un entreposage sécuritaire pour l'environnement tout en permettant une gestion simple des fumiers par les agriculteurs.

Les résultats de l'étude tendent à démontrer que les bénéfices escomptés du recouvrement ne sont pas aussi importants que prévus. De plus, le recouvrement des amas complique grandement la gestion des fumiers. Les toiles peuvent se déchirer, éliminant du coup les avantages escomptés. De toute manière, l'entreposage en sol argileux ou loameux ne présente pas une problématique au niveau des sols et des eaux souterraines qui justifierait le recouvrement. La modélisation semble suggérer que l'entreposage sur les loams sableux pourrait demander certaines précautions mineures. L'entreposage sur terrains sableux requiert cependant des précautions qui restent à définir.

21 mars 2001
15h25 à 17h00

Thème 9 : Technologies de traitement

Modératrice : N. Ouellet

LE VIRAGE TECHNOLOGIQUE DANS LES ABATTOIRS

Clément Tessier[1] et Luc Vanden-Abeele[2]

[1]Groupe SNC-Lavalin Audet, Longueuil, Québec, < Tessc@snc-lavalin.com >
[2]Centre de recherche industrielle du Québec, Montréal, Québec

INTRODUCTION DES CONFÉRENCIERS

Clément Tessier est directeur de projets et spécialiste en automatisation pour SNC-Lavalin Audet, localisé à Longueuil. Luc Vanden-Abeele est directeur adjoint du groupe Automatisation et Robotique au Centre de recherche industrielle du Québec, localisé à Montréal. Ces deux organisations se réunissent pour cette présentation car leurs expertises sont complémentaires, ce qui permet une couverture plus complète du sujet. En effet, SNC-Lavalin Audet est reconnu pour sa forte connaissance des procédés de découpe et de transformation de la viande alors que le CRIQ est renommé pour sa conception d'équipements technologiques à grande valeur ajoutée.

POURQUOI INVESTIR DANS L'AUTOMATISATION ?

Dans le monde industriel, l'automatisation a débuté il y a de nombreuses années dans des secteurs plus traditionnels tels l'automobile, l'électronique, les pâtes et papiers, etc.

Ce n'est que récemment que l'automatisation s'est implantée dans les abattoirs. Les difficultés techniques reliées au fait que la matière première n'est pas uniforme (il n'y a pas deux animaux pareils) ont rendu complexe tout projet d'automatisation. Par contre, les récents développements technologiques permettent d'envisager de nombreuses applications pour les abattoirs et usines de transformation de la viande.

L'automatisation de la découpe et du désossement de la viande possède plusieurs avantages :

- Accroissement de la régularité des coupes
- Augmentation du rendement de la matière première
- Hausse de la précision des coupes
- Réduction des coûts de production
- Baisse des coûts reliés aux accidents de travail

De plus, l'automatisation permet aux entreprises d'offrir des tâches plus intéressantes aux travailleurs.

On classe, de façon générale, les systèmes automatiques en deux grandes familles, soient les systèmes dédiés et les systèmes flexibles. Les systèmes dédiés sont actuellement plus courants et utilisent principalement une plate-forme électromécanique. Les systèmes flexibles sont plus récents car ils reposent sur de nouvelles technologies telles la robotique et la vision artificielle.

Les deux sections suivantes vont élaborer et détailler sur ces deux familles de systèmes automatiques.

SYSTÈME DÉDIÉ

Un système dédié est un montage électromécanique conçu pour accomplir une tâche bien précise. En comparaison avec un système robotisé, le nombre d'axes ou degrés de liberté est généralement inférieur à quatre. Principalement, on les utilise pour manipuler, emballer ou modifier un produit.

Dans les abattoirs, on les retrouve sous forme de :

- Convoyeurs ;
- Scie à découper ;
- Palettiseur ;
- Machine d'emballage ;
- Autres systèmes spécialisés.

Les systèmes dédiés utilisent principalement des technologies traditionnelles et éprouvées. Ce sont surtout des systèmes mécaniques avec, dans certains cas, des contrôles ou senseurs de base. On pense, par exemple, à des capteurs de position, des moteurs servos programmables, des senseurs sensibles à la couleur, etc.

On favorisera l'utilisation d'un système dédié lorsqu'il y a peu de variation d'une pièce de viande à l'autre ou lorsque l'opération nécessite une intervention humaine pour la compléter. De plus, il est avantageux d'utiliser un système dédié lorsque le produit a une bonne durée de vie (afin de bien rentabiliser l'investissement), l'espace de plancher disponible est très limité ou la cadence de production est très élevée. En effet, étant donné qu'un équipement dédié ne s'adapte pas ou peu à chaque pièce de viande, il est possible d'atteindre des grandes vitesses.

Pour des raisons de complexités techniques ou de sécurité, il est souvent plus avantageux d'utiliser un système dédié lorsqu'une intervention humaine est requise. On parlera alors d'un système semi-automatique.

Les principaux avantages d'utiliser un système dédié sont les suivants :

- Il s'adapte aux variations de cadence de production ;
- Il est facile de l'intégrer dans une ligne de production ;
- Le système compact (encombrement limité) ;
- Le système économique en fonction de la tâche à accomplir.

Étant conçus sur mesure, il est possible d'interconnecter physiquement entre eux plusieurs équipements dédiés.

En comparaison avec les systèmes robotisés, seule les fonctions essentielles seront développées et utilisées. On privilégie donc des technologies plus conservatrices pour les systèmes dédiés.

Utilisant principalement des composantes mécaniques, ces équipements nécessitent peu d'expertise spécialisée pour l'opération et l'entretien.

Les principaux inconvénients des systèmes dédiés sont les suivants:

- Peu flexible ;
- Coût d'acquisition en relation avec le nombre d'unités produites (équipements) ;
- Coût de développement du prototype élevé ;
- Rentabilité de l'équipement dédié est très sensible à la durée de vie du produit ;
- Peu de flexibilité au niveau de l'accomplissement d'autres tâches.

Étant dédié à une tâche et un produit en particulier, les systèmes dédiés démontrent une faible capacité d'adaptation aux changements et requièrent une période de temps plus ou moins longue de mise en course lors d'un changement de configuration d'un produit.

Contrairement aux robots qui constituent une plate forme électromécanique standardisée, les équipements dédiés sont difficilement récupérables lorsque l'application n'est plus requise ou lorsque les tâches à réaliser sur les pièces de viande changent. Ces équipements ne peuvent pas évoluer selon les besoins changeants de production.

Les exemples suivants sont des équipements dédiés utilisés dans les abattoirs :

- Système de coupe primaire (Danish Meat Research Institute) ;
- Système automatique de classement des carcasses (DMRI) ;
- Système automatique de séparation des carcasses en deux (Durand International) ;
- Équipement de séparation longe/flanc (Industries Riopel et Best & Donovan) ;
- Système de scies pour découper le pied et le jarret (Industries Riopel et Leblanc) ;
- Désossement du jambon (Macpro) ;
- Dégraissage de la longe (Marel).

Les trois premiers exemples seront démontrés à l'aide de séquences vidéo.

SYSTÈME FLEXIBLE

Les systèmes flexibles utilisent généralement un robot comme plate forme électromécanique. Ce sont des mécanismes à commande électronique. Les robots ont la capacité de se substituer à l'homme même pour des opérations complexes. Initialement développé pour l'industrie automobile, les robots ont démontré leur fiabilité et robustesse.

Le nombre d'axes ou degrés de liberté est généralement supérieur à quatre. Certains accessoires tels que la vision artificielle (images 2D et 3D), les sondes ultra sonique, l'infrarouge et autres capteurs spécialisés permettent aux robots de s'adapter à leur environnement ou de moduler la trajectoire de découpe selon la pièce de viande.

On utilise les systèmes flexibles lorsque :

- Il y a beaucoup de variation d'un produit à un autre ;
- La durée de vie du produit est limitée (i.e. changements réguliers dans les paramètres de production) ;
- La réalisation d'opération complexes nécessitant beaucoup de flexibilité ;
- L'intervention humaine n'est pas requise.

Les principaux avantages d'utiliser les systèmes flexibles sont :

- Une très grande flexibilité ;
- L'adaptation à son environnement grâce à l'utilisation de capteurs spécialisés ;
- L'amélioration du rendement (abattoir/viande).

En s'adaptant à la particularité de chaque produit, les systèmes flexibles peuvent avoir un impact sur le rendement des coupes de viande :

- Possède une très grande fiabilité (supérieur à sept ans) ;
- Plate forme électromécanique (robot) récupérable pour d'autres applications futures ;
- Possibilité d'inspecter le produit ou de s'adapter à chaque produit (vision artificielle) ;
- Coût de développement du prototype abordable.

La plate forme électromécanique (robot) étant déjà disponible (tablette), le concepteur peut se concentrer sur le développement de l'outillage et l'application.

Les principaux inconvénients associés aux systèmes flexibles sont :

- Les coûts d'acquisition et d'implantation demeurent relativement élevés ;
- La cadence de production peut être limitée selon la tâche à accomplir ;
- Les systèmes flexibles font appel à des technologies complexes.
- Certaines fonctions du robot ne sont pas requises.

Voici des exemples de systèmes flexibles utilisés en découpe de viande :

- Enlèvement des côtes de flanc (CRIQ) ;
- Parage des flancs (Lumetec) ;
- Enlèvement de l'os du coût (CRIQ);
- Découpes primaires (KUKA);
- Désossement des longes (Fraunhofer IPA).

Les trois premiers exemples seront démontrés à l'aide de séquences vidéo.

AUTRES AVANTAGES

Traçabilité

Dans l'industrie, on remarque depuis quelques temps une tendance forte afin d'obtenir une traçabilité des produits de viande, l'éleveur aux tablettes des épiceries. Ce mouvement semble actuellement plus important en Europe mais il est fort probable que, dans quelques années, tous les abattoirs seront tenus de mettre en œuvre des pratiques afin d'assurer la traçabilité.

L'automatisation des différentes tâches dans les abattoirs et les usines de découpe facilite les efforts pour implanter un système de traçabilité. En effet, la pièce de viande est à un moment ou un autre identifiée et contrôlée. Ceci permet plus facilement l'atteinte de pratiques de traçabilité.

HACCP

Ce n'est plus un secret pour personne, toutes les usines reliées au domaine agroalimentaire doivent se conformer à la norme HACCP. Quoique indirect, l'automatisation de certaines tâches facilite la mise en œuvre de cette norme. En effet, il y a une réduction des risques de dangers biologiques car moins de contacts ont lieu entre la viande et le personnel de l'usine. De plus, il est possible d'avoir un meilleur contrôle des points critiques car la tâche effectuée est faite de façon automatique.

Pénurie de main-d'œuvre

Autant au Québec, qu'ailleurs en Amérique du Nord et également en Europe, les abattoirs sont tous confrontés à un problème de pénurie de main-d'œuvre. Selon certaines études, le taux de roulement annuel moyen dans les abattoirs nord-américains serait de l'ordre de 40%. D'ailleurs, de nombreuses usines opèrent sans avoir tout le personnel requis.

Au Québec, plus particulièrement, des efforts et des argents sont investis par les abattoirs pour mettre en place une formation spécifique de bouchers industriels pour former la main-d'œuvre et assurer une relève.

En plus de faible taux de chômage, cette pénurie s'explique par les conditions difficiles de travail. En plus d'être des tâches très physiques pour plusieurs postes, il existe un danger certain car les employés manipulent des couteaux excessivement coupants. L'environnement est plutôt désagréable (relativement froid, taux d'humidité élevé, bruyant) et on note de nombreuses maladies industrielles (tendinites, bursites). Il n'est donc pas étonnant que, lorsque possible, les employés aillent travailler ailleurs.

Risques de contamination

L'hygiène des aliments est une préoccupation de plus en plus importante. Plus il y a d'humains qui touchent ou manipulent la viande, plus les risques de contamination sont élevés.

F3

PERSPECTIVES FUTURES

Nous avons précédemment vu les différents avantages et inconvénients des types d'automatisation. La technologie évoluant, nous nous permettons d'envisager quelles tendances futures nous pourrons retrouver dans les équipements automatisés pour les abattoirs.

En premier lieu, l'avènement de l'internet et son expansion permet de lier l'équipement, peu importe où il se situe, à son fabricant. Autant l'automate que le robot et l'ordinateur de vision artificielle seront connectés. Ce lien à distance donnera accès aux clients à de nouvelles possibilités :

- Modification de programmes pour ajuster ou adapter l'équipement à de nouvelles données de production
- Diagnostic à distance afin de réduire les coûts et les délais des appels de service
- Suivi des opérations et facilité de mettre en œuvre un programme d'entretien préventif

De plus, avec l'implantation plus fréquente d'ordinateurs sur des équipements de production, il devient possible d'envisager de faire du contrôle statistique du procédé en temps réel. Ceci constituerait un nouvel outil fort intéressant pour les gestionnaires de la production.

On peut également envisager que les équipements futurs seront dotés d'un certain niveau d'intelligence artificielle, réduisant au minimum les besoins d'ajustements lors de la mise en production. En effet, le système automatisé recevrait une rétro-action sur la qualité de la coupe qui vient d'être réalisée. Cette rétro-action permettrait au système de s'ajuster automatiquement et d'améliorer la coupe jusqu'au niveau désiré. Les développements de l'intelligence artificielle permettraient ce genre boucle d'apprentissage pour les équipements industriels. Dans le même ordre d'idée, on peut penser qu'il sera possible d'avoir une forme d'auto-diagnostic de l'équipement.

CONCLUSION

Nous avons vu les deux grands types d'équipements automatisés et leurs bénéfices et limites respectifs pour les abattoirs. Nous croyons que cette industrie est entrée dans une phase d'automatisation qui devrait aller en s'accentuant au cours des prochaines années.

Il n'existe pas, par contre, de solution universelle pour les différents postes de travail. Même si plusieurs tâches peuvent être automatisées, il sera toujours nécessaire d'avoir une intervention humaine pour compléter toutes les coupes et les autres fonctions. Il sera donc important de ne pas négliger l'interface homme-machine pour maximiser les investissements.

Les développements technologiques actuels, conjugués à la baisse des coûts des appareils électroniques, permettent d'envisager l'automatisation de tâches de plus en plus complexes et dangereuses, laissant aux opérateurs des tâches moins abrutissantes. Tous les acteurs importants, soient les entreprises, les employés et les clients sortiront gagnants de ce processus.

EFFECT OF HIGH PRESSURE TREATMENT OF MILK ON CHEDDAR CHEESE RIPENING

Pramod Pandey[1], Hosahalli Ramaswamy[1] and Daniel St-Gelais[2]

[1]Department of Food Science and Agricultural Chemistry, Macdonald Campus of McGill University, 21111 Lakeshore road, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, H9X 3V9
< ppande@po-box.mcgill.ca > < rammswamy@macdonald.mcgill.ca >
[2]Food Research and Development Center, 3600 Casavant Blvd West, St-Hyacinthe, Quebec, J2S 8E3 < stgelaisd@em.agr.ca >

ABSTRACT

There is a considerable interest in high pressure processing of foods in recent years due to its potential for making products with better functional properties and better microbiological stability. High-pressure treatments have been found to exert beneficial effects on milk, ranging from destruction of microorganisms to desirable changes in functional properties. However, not all functional changes would be desirable in the case of cheese making. Four different pressure processes were given to the milk in order to get 4D and 6D process at 300 MPa and 400 MPa which is enough to destroy 4 log and 6 log cycle of *Listeria monocytogenes*. Cheddar cheeses manufactured from raw milk, microfiltred milk, and pasteurized milk were used to compare the characteristics of high pressure treated milk cheese. Ripening characteristics of these cheeses were monitored for 90 days (15, 30, 60 and 90 days). In general, the firmness, springiness, gumminess and chewiness were high for cheese made from pressure treated milk as compared with their other control cheeses. All textural parameters remained unchanged throughout ripening period for the cheese made from raw milk. Lactobacillus count of cheese made from pressure treated milk initially showed higher count than other controls. Proteolysis rate was lower in the cheeses made from pressure treated milk than other controls. Microfiltred milk and raw milk showed faster proteolysis than other cheeses.

PULSED ELECTRIC FIELD PASTEURISATION OF FOODS

Michael Ngadi

Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec H9X 3V9 < ngadi@macdonald.mcgill.ca >

ABSTRACT

The increasing number of recent outbreaks of foodborne diseases linked to consumption of non-pasteurised food products has heightened the importance of pasteurisation technologies. Thermal processing has been the conventional method of food processing for decades. However, due to consumers' demand for freshlike and minimally thermal processed products, other novel technologies such as pulsed electric fields have received considerable interest. Pathogenic microorganisms in foods are inactivated during pulsed electric field processing as a result of electromechanical breakdown of their cell membranes.

Current research program on pulsed electric field (PEF) processing of food products at McGill University is discussed. Some of the critical parameters of PEF processing are identified and described. Potential applications of PEF in processing of liquid foods such as apple juice and liquid egg products are reviewed. Applications of pulsed electric field for treatment of solid foods are also presented. Merits and constraints of industrial application of PEF technologies in the food industry are discussed.

APPLICATION DE L'ÉLECTRODIALYSE AVEC MEMBRANES BIPOLAIRES À DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES

L. Bazinet, D. Ippersiel et F. Lamarche

Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 3600 Boulevard Casavant Ouest, St-Hyacinthe, Québec, J2S 8E3
<Bazinetl@em.agr.ca>, <Ippersield@em.agr.ca>, <Lamarchef@em.agr.ca>

INTRODUCTION

L'intérêt pour l'électrodialyse a été relancé récemment par le développement de nouveaux matériaux membranaires. Ces nouveaux matériaux offrent une excellente stabilité et de meilleures performances, favorisant l'apparition de nouvelles applications. Les membranes bipolaires, qui sont des membranes composites, permettent la dissociation des molécules d'eau (Mani, 1991). Les principales utilisations actuelles de l'électrodialyse avec membrane bipolaire (EDMBP) sont orientées vers la génération de bases et d'acides, ou la récupération d'acides organiques concentrés (Mani, 1991 ; Boyaval *et al.*, 1993). Récemment cette technologie a été appliquée dans le secteur alimentaire pour l'inhibition du brunissement enzymatique du jus de pomme frais (Tronc *et al.*, 1997; 1998), la séparation des protéines de soya (Bazinet *et al.*, 1997a) et la production d'isolats de caséines laitières (Bazinet *et al.*, 1999a, 2000a).

L'ÉLECTRODIALYSE

L'électrodialyse (ÉD) est un procédé électrochimique basé sur la migration d'espèces ioniques (chargées électriquement) à travers des membranes monopolaires à perméabilités sélectives, sous l'influence d'un champ électrique créé par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans une solution aqueuse riche en espèces ionisées minérales ou organiques (Gardais, 1990). La continuité électrique est assurée par le flux des ions (anions et cations) porteurs du courant.

L'ÉD est une technologie mature avec de nombreux systèmes en opération de par le monde. En Europe et au Japon, l'ÉD domine en tant que procédé de déminéralisation, respectivement pour le lactosérum et l'eau de mer, avec une capacité de l'ensemble des installations dépassant celle de l'osmose inverse et de la distillation (Shaposhnik et Kesore, 1997). Ces applications utilisent le principe de dilution-concentration par empilement de membranes au sein d'une cellule d'électrodialyse pouvant aller jusqu'à 300 membranes échangeuses d'ions monopolaires.

LES MEMBRANES IONIQUES

Les membranes ioniques (ou sélectives aux ions) (MI), qui sont en fait des résines échangeuses d'ions laminées, sont au coeur du procédé d'ÉD.

Il existe deux types principaux de MI basés sur la nature des groupes fonctionnelles fixés sur la matrice de polymère : les membranes perméables aux cations appelées membranes cationiques (MC) et les membranes perméables aux anions, appelées membranes anioniques

(MA). Ces membranes sont des membranes monopolaires, c'est-à-dire perméables à un seul type d'ions.

Un nouveau type de membrane, appelée membrane bipolaire, est apparu commercialement à la fin des années 1980. Les membranes bipolaires réalisent la dissociation des molécules d'eau en présence d'un champ électrique (Mani, 1991). Elles sont conçues pour fonctionner dans des conditions de courant limite et nécessitent des valeurs de courant limite beaucoup plus faibles que celles des membranes monopolaires.

Les membranes bipolaires sont dans la majorité des cas préparées en structure composite multicouches et formées de 3 régions : une couche anionique à permsélectivité élevée et ayant une excellente stabilité en solution alcaline; une couche cationique de permsélectivité équivalente; et à leur jonction une couche intermédiaire hydrophile avec des groupements ammonium tertiaire qui augmentent catalytiquement le taux de dissociation de l'eau (Strathmann *et al.*, 1993). Sous l'influence du champ électrique, l'eau diffusée à l'interface hydrophile de la membrane est dissociée en ions hydrogène (H^+) et hydroxyle (OH^-). Les ions H^+ et OH^- migrent respectivement à travers les couches cationique et anionique vers les compartiments situés de part et d'autre de la membrane pour assurer le transport du courant (Mani, 1991).

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRODIALYSE AVEC MEMBRANES BIPOLAIRES

L'électrodialyse avec membrane bipolaire (ÉDMBP) combine l'action de déminéralisation des membranes monopolaires et la particularité unique des membranes bipolaires à dissocier les molécules d'eau. L'ÉDMBP fonctionne dans deux sens : l'électroacidification (ÉAMBP) et l'électrobasification (ÉBMBP). Le pH d'une solution circulant à l'intérieur d'une cellule d'électrodialyse du côté cationique de la membrane bipolaire, où les H^+ sont générés, diminuera. De façon similaire, le pH d'une solution circulant du côté anionique de la membrane bipolaire, où les OH^- sont produits, augmentera.

Applications industrielles existantes ou potentielles

Les premières applications industrielles des membranes bipolaires ont été orientées vers la production d'acide et de base à partir d'une solution saline. L'alimentation d'un électrodialyseur avec une solution de sels et l'application d'une différence de potentiel aux bornes des électrodes conduisent à la conversion de la solution aqueuse de sels, tel que le chlorure de sodium, en la base NaOH et l'acide HCl. Ainsi, les sels tels que le KF, KNO_3, NH_4Cl, Na_2SO_4, KCl, etc..., de même que des sels organiques, peuvent aussi être dissociés pour former les acides et les bases correspondants. Le principal produit industriel bénéficiaire de l'usage des membranes bipolaires est évidemment la soude caustique (Hurwitz, 1999). L'ÉDMBP permet aussi la récupération d'acide sulfurique et de soude caustique à partir de sulfate de sodium résiduaire dans les industries chimiques de la viscose et de la pâte à papier ainsi que la régénération d'acide chlorhydrique et de soude diluées pour les résines échangeuses d'ions (Hurwitz, 1999). Récemment, cette technologie a été utilisée pour la production à l'échelle laboratoire d'acides propionique, lactique et salicylique concentrés (Boyaval et al., 1993).

Applications alimentaires

En 1990, Hatzidimitriu a breveté un procédé permettant l'ajustement du pH de fluide aqueux. Les revendications de ce brevet sont que ce procédé peut être utilisé pour ajuster l'acidité de fluides alimentaires tels que les sirops de sucre, les jus de fruits et de légumes, les vins, ainsi que les sauces et pâtes de tomates, par électrodialyse au sein d'une cellule comprenant des paires de cellules composées de membranes bipolaires et de membranes sélectives aux ions monopolaires. Plus spécifiquement, Dykalo *et al.* (1996) ont breveté un procédé permettant de contrôler l'acidité des produits laitiers contenant une phase aqueuse. Ces deux applications, bien qu'utilisant directement la génération de protons produits à l'interface de la membrane bipolaire ont ouvert la voie à de nouvelles applications alimentaires au-delà de la production d'acide et de bases. Récemment, l'ÉDMBP a été appliquée au jus de pomme (Tronc *et al.*, 1997 ; 1998) aux protéines de soya (Bazinet *et al.*, 1997a) et aux caséines du lait (Bazinet et al., 1999a, 2000a). Ces applications ne visent pas seulement le simple ajustement du pH mais aussi l'effet indirect de la dissociation des molécules d'eau sur le produit traité.

Inhibition du brunissement enzymatique du jus de pomme frais opalescent

La production de jus de haute qualité est rendue difficile par la présence de quantités importantes de polyphénols et de polyphénol oxydases (E.C.1.14.18.1, PPO). Ces composés fixés sur les particules en suspension et contenus dans le jus de pomme opalescent rendent ce dernier très sensible au brunissement enzymatique. Les réactions de brunissement enzymatique sont catalysées par la PPO et résultent en l'oxydation des composés phénoliques en ortho-quinones qui polymérisent par la suite en pigments complexes foncés (Macheix *et al.*, 1990).

Zemel *et al.* (1990) ont démontré que l'activité de la PPO pouvait être inhibée de façon irréversible par une diminution temporaire du pH à 2.0, à l'aide de HCl et par un réajustement du pH à sa valeur initiale de 3.5 en ajoutant une solution de NaOH. Ce traitement a effectivement inhibé le brunissement enzymatique et stabilisé le jus de pomme, mais l'effet de dilution lié à l'ajout d'acide et de base et la formation de sels ($NaOH + HCl \rightarrow NaCl + H_2O$) ont rendu le jus impropre à la consommation.

Partant de ces observations, Tronc *et al.* (1997 ; 1998) ont utilisé les membranes bipolaires pour baisser le pH du jus de pomme opalescent. Dans un premier temps, le jus de pomme circulait du côté cationique de la membrane bipolaire, là où sont générés les ions H^+ ions. Le pH du jus de pomme a été abaissé temporairement de 3.5 à 2.0, à l'échelle laboratoire, à l'aide d'un électrodialyseur et à une intensité constante de 40 mA/cm^2. Cependant, l'ajout de sel (KCl) a été nécessaire pour atteindre la valeur de pH 2.0, la solution de jus de pomme n'étant pas assez riche en ions libres à mobilité élevée. Ainsi, le K^+ exogène permet l'accumulation des H^+ dans le jus en compensant la perte de K^+ du jus et en maintenant l'électroneutralité du milieu (Tronc *et al.*, 1998). La baisse du pH du jus à 2.0 a inhibé complètement l'activité de la polyphénol oxydase en comparaison avec un témoin (Tronc *et al.*, 1998). Dans un deuxième temps, suite à l'acidification, le pH du jus a été retourné à sa valeur initiale par l'introduction des OH^- produits par dissociation des molécules d'eau ; le jus a été mis à circuler du côté anionique de la membrane bipolaire, là où les OH^- sont produits. Le réajustement du pH a partiellement réactivé la PPO, mais l'inhibition du brunissement a été pour sa part complète et irréversible. Le traitement a permis d'obtenir un jus de pomme opalescent de couleur attrayante sans en altérer la

saveur au cours de l'entreposage (Trono *et al.*, 1997; 1998). L'utilisation de l'ÉDMBP permet donc une stabilisation non thermique, de façon simple, efficace et applicable aux liquides alimentaires.

Production d'isolats de protéines de soya

Les protéines de soya utilisées dans l'industrie alimentaire le sont majoritairement sous la forme d'isolats de protéines. La séparation par précipitation isoélectrique des protéines de soya à un pH compris entre pH 4.2 et 4.6 est reconnue comme le principal procédé industriel.

Le procédé conventionnel comporte 5 étapes : l'extraction, la précipitation, le lavage, la resolubilisation et le séchage. Les flocons de soya dégraissés sont dissous dans de l'eau à pH 9 ± 2 dans des ratios allant de 6:1 à 20:1 et à une température inférieure à 80°C. La phase d'extraction dure généralement 30 minutes. Une fois l'extraction terminée, les protéines sont séparées par abaissement du pH à leur point isoélectrique, environ 4.5, avec de l'acide minéral concentré. La centrifugation permet de séparer le caillé protéique du surnageant (ou phytosérum) contenant les matières solubles. Le caillé est alors lavé à l'eau pour ôter les impuretés solubles restantes. Une fois le caillé rincé, il est neutralisé par un ajout de soude caustique concentrée afin d'obtenir les protéines sous forme de protéinate soluble. Le produit final est séché par atomisation et empaqueté sous forme sèche (Bazinet *et al., 1998*).

Tous les isolats commerciaux de protéines de soya sont produits par précipitation acide. Le désavantage est que les fluctuations extrêmes locales de pH peuvent causer une dénaturation irréversible des protéines. Cette dénaturation par des traitements acides engendre une altération de la solubilité des protéines de l'isolat après réhydratation et un contenu élevé en cendres (Nash et Wolf, 1967 ; Fisher *et al.*, 1986 ; Kilara et Sharkasi, 1986).

Dans ce contexte, une procédure utilisant l'ÉDMBP a été développée pour précipiter les protéines de soya (Bazinet *et al.*, 1997a). Dans ce procédé, les protons générés par la membrane bipolaire entrent en contact avec les protéines, tout en abaissant le pH de la solution à leur point isoélectrique, résultant en une séparation sélective de ces dernières. Une étape de centrifugation peut alors être employée, comme dans le procédé commercial de séparation des protéines. Le pH de la solution protéique a été baissé de pH 8.0 à 4.5 dans une cellule de 100 cm^2 de surface effective d'électrode, à une intensité de courant de 25 mA/cm^2. L'atteinte du point isoélectrique par ÉAMBP a permis la préparation d'un isolat protéique (à 96% de protéines). Ces protéines ont présenté une qualité compositionnelle supérieure ou égale à celle de produits commerciaux de référence (SUPRO-515, SUPRO-500 et SUPRO-600) et des propriétés fonctionnelles comparables à ces derniers (Bazinet *et al.*, 1997a). L'ajout de sel (KCl) améliore l'efficacité énergétique du système par une diminution de la résistance électrique globale du système d'électrodialyse (Bazinet *et al.*, 1997b). En effet, l'ion K^+ est la principale espèce ionique à électromigrer afin de conserver l'électroneutralité de la solution protéique traitée par ÉAMBP; les ions K^+ migrés sont corrélés dans un ratio 1:1 avec le nombre de H^+ électrogénérés (Bazinet *et al.*, 1999b). Récemment, suite à une étude menée par Bazinet *et al.* (2000b), il apparaît que la température a une grande importance sur la précipitation sélective des fractions protéiques de soya au cours du procédé d'électro-acidification avec membranes bipolaires. En baissant la température à 10°C, les globulines 11S précipitent à un pH plus élevé, pH 6.69 contre 5.95 à 27°C, permettant leur fractionnement, des autres fractions protéiques. Par ce procédé, il est donc possible d'obtenir deux

fractions, l'une riche en 11S et l'autre en 7S. L'ÉAMBP semblerait donc être une voie d'avenir pour le fractionnement des protéines.

Production d'isolats de caséine laitière

Au niveau industriel, seules les méthodes d'acidifications chimiques ou par la présure sont employées pour la production de caséines. Pour la production de caséines acides, les trois procédures existantes sont basées sur la précipitation isoélectrique des caséines soit par acidification chimique, échange ionique ou fermentation. Récemment, d'autres techniques ont été proposées pour la production de caséines acides : acidification du lait par échange ionique couplé à un acide (Salmon, 1983), par électrodialyse du lait écrémé à pH 5.0 suivi d'une acidification à pH 4.6 par un acide (Laiteries Triballat, 1979) ; par acidification à l'aide de protons générés par l'électrolyse des molécules d'eau à l'interface de membranes empilées au sein d'un système d'électrodialyse (ÉD) (Procédé SAFIR, Bolzer, 1985).

Les techniques de production de caséine utilisées en industrie ont dans la majorité des cas le désavantage de générer de grands volumes d'effluents chimiques, dus à l'ajout de bases et d'acides durant les traitements, et d'engendrer des risques inhérents liés à la manipulation, au stockage et au transport des acides et des bases fortes. Dans le cas des fermentations, il est nécessaire d'utiliser des ferments mixtes et de les changer régulièrement afin d'éviter les contaminations par les phages. D'autre part, au cours de la fabrication des caséines présure, la cas-κ est dénaturée par formation de deux molécules, le caséino-macropeptide et la para-caséine-κ (Cayot et Lorient, 1998 ; Cheftel *et al.*, 1985). Enfin pour ce qui est du procédé SAFIR, il a été démontré que la génération de protons à la surface des membranes anioniques et cationiques se fait avec une moins grande efficacité électrique que lors de l'utilisation dans l'électrodialyseur de membranes spécifiques bipolaires (Bazinet *et al.*, 1997a).

Pour pallier ces défauts, l'ÉDMBP a été appliquée à la précipitation des caséines du lait. Comme dans le procédé pour le soya, l'électrogénération de H^+ à l'interface cationique de la membrane bipolaire abaisse le pH de la solution jusqu'au point isoélectrique des caséines. Le pH de la solution protéique a été baissé de pH 6.8 à 4.4 dans une cellule de 100 cm^2 de surface effective d'électrode, à une intensité de courant de 20 mA/cm^2. Des isolats de haute pureté contenant 1.2-3.8% de cendres et 85-98% de protéines ont été produits par ÉAMBP et les seules protéines solubles restantes après électroacidification étaient les protéines sériques (Bazinet *et al.*, 1999a). Différents facteurs ont influencé les performances de la technologie en terme de cinétique de précipitation protéique et d'éfficacité énergétique: le débit, le type de lait, la permsélectivité des membranes cationiques, la nature des sels et la force ionique de la solution. Le nombre de H^+ électrogénérés au cours de l'ÉAMBP a été évalué à 60-78 méq./L de solution de protéines à 10% de solide et il a été démontré que les K^+ sont l'espèce ionique nécessaire pour limiter la migration non désirée des H^+ au travers de la MC (Bazinet *et al.*, 2000c). Ainsi, au niveau de l'efficacité énergétique, la meilleure combinaison est l'ajout de KCl à une force ionique de 0.5 M : elle a permis une diminution de l'énergie consommée de 45% par rapport à une solution traitée sans ajout de sel (Bazinet *et al.*, 2001). Enfin, il est ressorti de ces études que les isolats produits par ÉAMBP avec différents types de sels et à différents niveaux de forces ioniques ajoutées, excepté pour les isolats produits par l'ajout de $CaCl_2$ à une force ionique de 1M et déminéralisés à 75%, ont montré des propriétés physicochimiques et fonctionnelles

similaires entre eux et à celles d'un isolat produit chimiquement et des isolats commerciaux (Bazinet, 2000).

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉDMBP

L'ÉDMBP a de nombreux avantages par rapport aux procédés conventionnels de précipitation isoélectriques des protéines et de production de jus de pomme opalescent utilisés en industrie. L'ÉDMBP utilise l'électricité pour générer les espèces ioniques désirées pour acidifier ou alcaliniser de façon douce les solutions traitées. La dissociation de l'eau à l'interface hydrophile de la membrane bipolaire se fait de façon continue tout en évitant les excès locaux d'acide. Dans l'électrodialyseur, le processus de dissociation des molécules d'eau permet non seulement l'acidification de la solution, mais aussi sa basification, ou la production d'une base en solution qui peut être utilisée pour l'étape d'extraction ou de neutralisation dans le cas des protéines. La génération *in situ* et la réutilisation des composés dangereux pour l'environnement (acides et bases) suppriment par conséquent les inconvénients et les risques liés au transport, au stockage, à l'utilisation et à l'élimination de ces matières. La consommation d'eau est diminuée par réutilisation d'une partie des effluents générés et la consommation énergétique est peu élevée (moins de 0.5 kW.h/kg d'isolat produit) (Bazinet *et al.*, 1998). De plus, par l'utilisation à la base d'un système d'électrodialyse, système connu en industrie, cette technologie est facilement adaptable au niveau industriel. Une cellule d'électrodialyse, de par les nombreux formats disponibles à l'heure actuelle sur le marché, peut être adaptée à tous les niveaux de production et par conséquent à toutes les tailles d'entreprises. Enfin, pour l'industriel producteur d'isolats de protéines ou de jus de pommes, L'ÉDMBP a aussi pour avantage de s'insérer parfaitement dans le schéma du procédé conventionnel. L'installation de cette technologie ne demanderait pas une reconceptualisation complète du procédé de production, mais seulement quelques modifications (Bazinet *et al.*, 1998).

Les principales limites de l'ÉDMBP sont le prix élevé de l'équipement de base et les susceptibilités de colmatage à long terme. Cependant, ces désavantages sont le résultat de la récence de cette technologie. Le développement de l'ÉDMBP et ces applications dans l'industrie alimentaire participeraient à diminuer le coût des membranes bipolaires et des électrodialyseurs. Deux types de colmatage existent : le colmatage des cadres séparateurs et le colmatage des membranes. Le colmatage des cadres séparateurs est lié aux suspensions protéiques qui s'agglomèrent entre elles pour former un réseau protéique dans le grillage des cadres séparateurs. Ce colmatage diffère de celui fréquemment rencontré en ultrafiltration ou nanofiltration et a pour inconvénient de faire augmenter le voltage appliqué aux bornes de la cellule et de diminuer l'efficacité énergétique du système. Cependant, une centrifugation en ligne à l'entrée et/ou à la sortie de la cellule d'électrodialyse permettrait de limiter cette formation non désirée au sein du système. Dans le cas des caséines, un autre type de colmatage apparaît en cours de procédé : le colmatage des membranes cationiques. La formation de carbonate et probablement d'hydroxyde de calcium en cours d'ÉAMBP aussi bien en surface qu'à l'intérieur des MEC diminue la durée de vie de ces membranes et l'efficacité énergétique du système à court terme (Bazinet, 2000). Une étude effectuée sur les membranes cationiques laisse toutefois suggérer qu'un nettoyage régulier des membranes lors d'une procédure de nettoyage en place serait efficace pour éviter la formation de ce colmatage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bazinet, L. 2000. Thèse de Doctorat Université Laval, Qc, Canada.

Bazinet, L., Lamarche, F., Ippersiel, D. 1998. Trends Food Sci. Techn., 9, 107-113.

Bazinet, L., Lamarche, F., Ippersiel, D. 1999b.. J. Membr. Sci., 154 (1), 61-71.

Bazinet, L., Lamarche, F., Labrecque, R., Ippersiel, D. 1997b. J. Agric. Food. Chem., 45(7), 2419-2425.

Bazinet, L., Lamarche, F., Labrecque, R., Toupin, R., Boulet, M., Ippersiel, D. 1997a. Food Technol., 51(9), 52-56, 58, 60.

Bazinet, L.; Ippersiel, D.; Gendron, C.; Beaudry, J.; Mahdavi, B.; Amiot, J.; Lamarche, F. 2000c. J. Membr. Sci., 173(2), 201-209.

Bazinet, L.; Ippersiel, D.; Gendron, C.; Mahdavi, B.; Amiot, J.; Lamarche, F. 2001. J. Dairy Res., sous presse.

Bazinet, L.; Ippersiel, D.; Labrecque, R.; Lamarche, F. 2000b. Biotechnology Progress, 16, 292-295.

Bazinet, L.; Lamarche, F.; Ippersiel, D.; Amiot, J. 1999a. J. Agric. Food Chem., 47 (12), 5291-5296.

Bazinet, L.; Lamarche, F.; Ippersiel, D.; Gendron, C.; Mahdavi, B.; Amiot, J. 2000a. J. Food Sci., sous presse.

Bolzer, R. 1985. U.S. Patent n° 4 559 119.

Boyaval, P.; Seta, J.; Gavach, C. 1993. *Enzyme Microb. Technol.*, 15, 683-686.

Cayot, P.; Lorient, D. Structures et technofonctions des protéines du lait. Arilait Recherches, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 1998.

Cheftel, J.C.; Cuq, J.L.; Lorient, D. 1985. Protéines Alimentaires : Biochimie, Propriétés Fonctionnelles, Valeur Nutritionnelle, Modifications Chimiques. Technique et Documentation Lavoisier, Paris.

Dykalo, N.Ya.; Gavrilov, G.B.; Kim, V.V. 1996. U.S.S.R. Patent n° RU2 052 942-C1.

Fisher, R.R.; Glatz, C.E.; Murphy, P.A. 1986. *Biotech. Bioeng.*, 28, 1056-1063.

Gardais, D. 1990. Environnement et Electricité. Electra, Doppee difffusion, Avon, pp.200-310.

Hatzidimitriu, S.E. 1990. U.S. Patent n° 4 936 962.

Hurwitz, H. 1999. Symposium sur les applications alimentaires de l'électrodialyse. Fondation des Gouverneurs, Saint-Hyacinthe, Québec, 23 et 24 Mars.

Kilara, A.; Sharkasi, T.Y. 1986. *CRC-Crit. Rev. In Food Sci. Nutr.*, 23, 323-395.

Laiteries Triballat. 1979. Brevet français n° 2 428 626.

Macheix, J.J., Fleuriet, A.; Billot, J. 1990. Fruit Phenolics. CRC Press, Boca Raton.

Mani, K.N. 1991.. *J. Membr. Sci.* 58, 117-138

Mani, K.N., Chlanda, F.P.; Nagasubramanian, K. 1988. *Desalination,* 68, 149-167.

Nash, A.M.;Wolf, W.J. 1967. *J. Cereal Chem.*, 44, 183-192

Salmon, M. 1983. US Patent n° 4 423 081.

Shaposhnik, V.A.; Kesore, K. 1997. *J. Membr. Sci.*, 136, 35-39.

Sharp, P.F.; Mc Inerney, T.J. 1936. *J. Dairy Sci.*, 56, 573-579.

Strathmann, H.; Rapp, H.-J.; Bauer, B.; Bell, C.M. 1993. *Desalination*, 90, 303-323.

Tronc, J-S.; Lamarche, F.; Makhlouf, J. 1997. *J. Food Sci.* 1, 75-78

Tronc, J-S.; Lamarche, F.; Makhlouf, J. 1998. *J. Agric. Food Chem.* 46, 829-833.

Waggle, D.H.; Kolar, C.W. 1979. Soy Protein and Human Nutrition, H.L. Wickle, D.T. Hopkins, D.H. Waggle (eds.), Academic Press, New York.

Zemel, G.P.; Sims, C.A.; Marshall, M.R.; Balaban, M. 1990. *J. Food Sci.*, 55, 562-565.

MICROWAVE-ASSISTED EXTRACTION TECHNOLOGY IN NUTRACEUTICAL

Jianming Dai and G.S.V. Raghavan

Department of Agricultural & Biosystems Engineering, Macdonald Campus of McGill University, 21111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9
< jdai1@po-box.mcgill.ca >

INTRODUCTION

Nutraceuticals is the terms to describe foods that demonstrate to have physiological or show protection against chronic diseases. Within this category there is a class of special nutruceuticals – the herbal concentrates. They are produced from the herbal materials, and the production normally uses solvent extraction which is normally a long, low efficient process. In this paper, we introduce a microwave-assisted extraction technique and suggest that this technique may solve the existing problems. The basic concepts as well as the most widely accepted mechanism of this technology are introduced.

WHAT IS NUTRACEUTICAL?

Nutraceuticals is the term to describe foods that demonstrate to have a physiological or show protection against chronic diseases. Since this is a relatively new term, there is no standard definition for it. Its definition may vary from country to country. In Europe, the nutraceuticals are restricted to natural ingredients, while in the US the ingredient does not have to be of natural origin. In Canada, the term nutraceuticals is defined by Health Canada in 1996 as "a product produced from food but sold in pills, powders (potions) and other medicinal forms not generally associated with food and demonstrated to have a physiological benefit or provide protection against chronic disease" (Health Canada, 1996). As in many countries, nutraceuticals in Canada fall into a grey and ambiguous area - somewhere between food and drug. Canada currently has no regulations, nor standards, for nutraceuticals. Under existing law, sellers of herbal remedies and nutritional supplements are not allowed to claim any specific health benefits on the label. If they do, the product technically becomes a drug and its efficacy must be proven by clinical trials (Small and Catling, 1999).

A SPECIAL CLASS OF NUTRACEUTICALS

Under nutraceuticals, there is a big class of products, herbal extracts or concentrates. They are not food related and people believe that there are medicinal benefit even though it is not allowed to label any specific benefits. This class of nutraeuticals is especially popular in Europe, where there is a strong consumer interest in homeopathic and herbal medicines (Small and Catling, 1999).

THE PRODUCTION OF NUTRACEUTICALS

The production of the herbal-based extracts or concentrates is normally carried out by solvent extraction, a process using solvent to separate the desired ingredients from the matrix. The available technique for this process is solvent direct extraction with ambient or elevated temperature. This normally needs a very long processing time. For some products, when high temperature is necessary for the separation process, the disadvantages are apparent. The high temperature over a long processing time will destroy the heat sensitive ingredients. Furthermore, from the energy and solvent consumption point of view, more efficient new technology is necessary. Great efforts have been made to find alternative methods for the separation. Microwave-assisted extraction is one of these approaches.

WHAT IS MICROWAVE-ASSISTED EXTRACTION (MAE)?

MAE is a separation technique that introduces the microwave energy into a separation process. The introduction of the microwave energy brings new characteristics to the separation process due to the special energy-matter interaction properties.

WHAT IS MICROWAVE?

Microwaves are electromagnetic waves that fall in the frequency range of 300 MHz – 30 GHz. Since this frequency range is also extensively used in RADAR transmission and telecommunications, regulations were made to limit the frequencies that can be used for industry, scientific, and medicinal purposes (ISM frequencies). The frequencies of 2450 MHz and 915 MHz, are frequently employed in the industry use. 2450 MHz is used for most domestic microwave ovens and the microwave-assisted extraction equipments.

MICROWAVE-MATTER INTERACTION

The microwave-matter interaction is mainly caused by the interaction of the microwave with the polar molecules. In a polar molecule, due to the difference of the electronegativity of different atoms and the specific structure of the molecule, the whole molecule exhibits a partial positive charge and a partial negative charge and thus forms a dipole. When the microwave consisting of an alternative electric field and magnetic field is applied on the matter with polar molecules in it, the alternative electric field causes the dipoles fast oscillating. At the frequency of 2450 MHz, the dipoles will change their directions 2.45×10^9 times per second. The friction caused by the fast oscillations results in the rapid heating of the material. Since microwave can penetrate into the materials, the heating effect happens throughout the material and is called volumetric heating. This special heating effect makes microwave a very efficient heating method. Also, this special heating effect brings new characteristics when introduced into separation processes.

In microwave heating, two parameters, namely dielectric constant (γ') and loss factor (γ'') define the dielectric properties of materials and are important parameters for the microwave heating. The dielectric constant describes the ability of a molecule to be polarized by the electric field, while the loss factor measures the efficiency with which the microwave energy can be converted

into heat. Molecules with different dielectric properties, when exposed to microwave irradiation, have different absorption ability. Normally, it is believed that the higher the dielectric constant,

the more efficient the molecule absorbs microwave energy. Molecules with very low dielectric constants can not couple with the electronic oscillation effectively, therefore can not absorb microwave energy. We call this type of molecules microwave transparent. This selectivity in heating molecules with different dielectric properties brings important character to the MAE separation process.

MAE OF PLANT MATERIALS

Solvent extraction is a process using solvent to separation components that contains the target components from the solid matrix. The extraction is based on the diffusion. The extraction rate and the quality of the extract depend on many factors, among which the most important ones are: the characteristic of the matrix, the distribution of the target components in the matrix, the solubility of the solvent to the target components and the interfering components, and the temperature. The higher the permeability of the matrix to the solvents, the easier the solvent gets contact to the target components, and consequently results in a higher extraction rate. Matrix with membrane system or target components located in the micro-membrane systems requires that the target components diffuse into the solvent through the membrane, therefore slow down the process. However, the breakdown of the membrane system will drastically accelerate the extraction process. The solubility of the solvent to the target components and the interfering components decide the quality of the extract. The most desired solvents are those with high solubility to the target components and low to the interfering ones. However, this is normally not the case. Temperature is important in the extraction process because the higher the temperature the higher the diffusion rate and consequently the higher the extraction rate. However in some extraction process, high temperature over long extraction times is not desired due to the decomposition of heat-sensitive components. In MAE, due to the special heating characters, these influencing factors will change and resulting in a more efficient extraction method.

In MAE, the introduction of microwave energy brings a combined effect to the extraction process. In a polar-solvent extraction process, the solvent will absorb most of the energy resulting in an increase in temperature. The temperature increase can accelerate the diffusion process. In this sense, microwave energy has no difference with the ordinary heating methods. However, in the extraction system, microwave cannot only interact with the solvent, it can also interact with the components inside the solid matrix. The components may have different forms inside the matrix, some are in the free forms and some may be bounded in the matrix structure or other components. The interaction of the microwave with the bounded components can free these components thus resulting in easier diffusion to the solvents. Another mechanism involved in the extraction process is due to the interaction of the microwave with the solvents permeated into the matrix. The interaction causes a local heating effect within the matrix leading to a local agitation resulting in increase extraction. The acceleration effect of MAE was reported by Dai *et al.* (In review process) when they use MAE to extract azadirachtin related limonoids from the fresh neem leaves with methanol as solvents. Ni et al. (2000) also reported the accelerating effect when they extracted flavone glycosides from ginkgo leaves using a few different solvents.

The special extraction mechanism of microwave-assisted extraction can be better explained when a non-polar solvent is used in extracting fresh plant materials. It needs to be noted here,

water, a polar molecule which can very efficiently absorb microwave energy, plays an important role in the MAE process. Paré and Belanger (1994) studied the extraction of fresh mint leaf with a non-polar solvent under microwave irradiation. Fresh plant materials such as mint leaves are made of a multitude of pocket-like cavities that are defined by the cells, glands, vascular vessels, and the like, all of which contain different chemical species and more importantly different level of water content. When the system of fresh mint leaf and a non-polar solvent is exposed to microwave radiation, microwave will travel freely through the solvent that is transparent to microwave energy and reach the sample. A significant fraction of microwave rays is absorbed by the sample, mainly the water in the glandular and vascular systems, which results in a sudden temperature rise inside the sample. The rise of temperature causes gasification of the water in the glandular and vascular systems. The gasification causes a dramatic expansion in volume and thus creates an explosion at the cell level. The substances located in the cells are then free to flow out of the cell to the surrounding solvent. The scanning electron micrographs of the extracted fresh pepper mint reveals that after 40 s of irradiation, the gland system of the pepper mint leaf was totally disrupted, while two-hour distillation causing only the shrinkage of them (Figure 1). Even though not all samples have the same micro-structure as the fresh leaves, selective and localized fast heating effects play an important role in the high efficiency of extracting target components into the solvents.

A B C

Figure 1. Scanning electron micrograph of (A) Untreated fresh mint gland; (B) Soxhlet extraction for 6 hrs; (C) Microwave irradiation for 20 s (adapted from Paré and Belanger, 1994).

From the above description, it is quite understandable that microwave assisted extraction is a very efficient method for extraction of key components from plant materials. Ganzler *et al.* (1986) reported that for the extraction of crude fat, vicine, convicine, and gossypol from oil seeds, duration with MAE method is almost 100 times less than those for traditional methods. Paré (1995) compared the MAE extraction of apiole and oil from sea parsley with distillation method. The results showed that with 50 s irradiation of microwave at 625W with hexane as solvent, the yield of the apiole is almost the same as that with microwave and the oil extracted a little bit lower than that obtained by 90 min distillation. Paré (1995), in his patent listed the application of microwave-assisted extraction on various plant materials, the results showed that 40 s to around two minutes microwave irradiation treatment to sea parsley, pepper mint leaves, cedar, garlic obtained extracts of interest compared to that obtained by 90 min to several hrs of steam distillation or similar standard methods.

MAE IN NUTRACEUTICALS PRODUCTION

As can be seen from the above description about the MAE, this method is a combination of heating effect and special microwave acceleration effect due to the unique heating characteristic of microwave energy. This makes MAE a very efficient liquid-solid separation method, especially effective for the fresh plant samples as suggested by Paré (1995). The advantages of this technique as compared to the conventional separation methods as well as the more advanced SFE technique include extraction time saving, better selectivity, solvent saving (Paré, 1995). The method becomes more advantageous when the heat sensitive target components are extracted sue to its short exposure to high temperature as compared to conventional methods. These advantages make this technique a very attractive alternative to the conventional ones. However, since this is a relatively new technique, much of the work is still limited in the laboratory. Even though the bench-scale and industrial scale equipments are also available, there are not many reports regarding the efficiency in the industrial scale. More work has to be done before this technique can be widely applied in the production of the nutraceuticals.

LITERATURES

Dai, J.; Yaylayan, V.A.; Raghavan, G.S.V.; Pare, J.R.; Liu, Z. 2001. Microwave-assisted extraction of azadirachtin related limonoids from neem under atmospheric pressure conditions. (*J. Natural Product,* in review process).

Ganzler, K.; Salgo, A.; and Valko, K. 1986. Microwave extraction: a novel sample preparation method for chromatography. *Journal of Chromatography.* 371, 299-306.

Health Canada. 1996. Recommendations for defining and dealing with functional foods. http://www.legalsuites.com/Buletin%20Jun%2097.htm.

Ni, H.; Liu, Z.; Zhang, Y.; Zhou, C.; Nie, J.; and Liu, F. 2000. Using microwave process for he extraction of Ginkgo flavone Glycosides. Presented at Microwave 2000: sustainable technology for the new millennium and the third Chinese microwave chemistry symposium. May 7-10, 2000, Nankai University, Tianjin, P.R.China.

Paré, J. R. J. 1995. *U.S. Patent* 5 458 897. (various international counterparts).

Paré, J. R. J. and Bélanger, J. M. R. 1994. Microwave-Assisted Process (MAP): a new tool for the analytical laboratory. *Trends Anal. Chem.* 13(4), 176-84.

Small, E. and Catling M.P. 1999. Canadian medicinal crops. NRC Research Press, Ottawa.

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT

irda

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), c'est...

www.irda.qc.ca

Un grand but

Le développement d'une agriculture durable par l'avancement des connaissances et des technologies.

Plusieurs préoccupations

- **La protection de l'environnement;**
- **La mise en valeur des systèmes agroalimentaires;**
- **La rentabilité et la compétitivité des entreprises;**
- **Le bien-être de la collectivité.**

Une expertise confirmée

- **Plus de 30 chercheurs expérimentés et reconnus dont 4 ingénieurs.**

Une centaine de projets de R-D

Une implication dans près de 140 projets, dont certains en ingénierie agroalimentaire :

- **La valorisation des résidus d'origine agricole par le lombricompostage et la production de champignons;**
- **La gestion du lixiviat des aires d'hivernage et la validation des normes et des procédures à caractère agroenvironnemental;**
- **La gestion de l'énergie dans les bâtiments d'élevage;**
- **Le traitement des lisiers par une approche de séparation efficace des lisiers dans sa fraction solide et liquide;**
- **La gestion des gaz, des pathogènes et des odeurs dans les bâtiments d'élevage.**

Découvrez l'IRDA